



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

Kelvin de Paula Sobrinho

**Avaliação do efeito *curling* no comportamento de ligações
aparafusadas de aços inoxidáveis submetidas ao corte**

Rio de Janeiro
2019

Kelvin de Paula Sobrinho

Avaliação do efeito *curling* no comportamento de ligações aparafusadas de aços inoxidáveis submetidas ao corte



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Orientadores: Prof. Dr. André Tenchini da Silva
Prof.^a Dr.^a Monique Rodrigues Cordeiro
Prof. Dr. José Alexandre Gouveia Henriques

Rio de Janeiro

2019

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

P324 Paula Sobrinho, Kelvin de.
Avaliação do efeito curling no comportamento de ligações
aparafusadas de aços inoxidáveis submetidas ao corte / Kelvin de
Paula Sobrinho. – 2019.
120f.

Orientadores: André Tenchini da Silva, Monique Rodrigues
Cordeiro, José Alexandre Gouveia Henriques.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Ligações parafusadas - Teses.
3. Aço inoxidável - Teses. 4. Resistência de materiais - Teses. 5.
Análise numérica - Teses. I. Silva, André Tenchini da. II. Cordeiro,
Monique Rodrigues. III. Henriques, José Alexandre Gouveia. IV.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de
Engenharia. V. Título.

CDU 624.078.4

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial
desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Kelvin de Paula Sobrinho

Avaliação do efeito *curling* no comportamento de ligações aparafusadas de aços inoxidáveis submetidas ao corte

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovado em: 22 de fevereiro de 2019.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. André Tenchini da Silva
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr^a. Monique Cordeiro Rodrigues
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. José Alexandre Gouveia Henriques
Faculty of Engineering Technology – UHasselt, Belgium

Prof. Dr. Pedro Colmar Gonçalves Da Silva Vellasco
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr^a. Juliana da Cruz Vianna Pires
Departamento de Engenharia Civil – UFES

Rio de Janeiro

2019

DEDICATÓRIA

Dedico esta, bem como todas as demais conquistas a Deus. Sua presença sublime me deu força para suportar os momentos de provação e de dúvida, sendo minha base e fortaleza. Se não sentisse sua presença junto a mim, saberia que seria impossível. Sou eternamente grato pela força e pelos sinais de superação que me conduzem a busca constante pelo crescimento pessoal e profissional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por estar presente em todas as etapas deste trabalho, me dando força, saúde e sabedoria.

Aos meus orientadores, Prof. André Tenchini, Prof.^a Monique Cordeiro e Prof. José Alexandre por todo apoio e força de vontade em todos os momentos, pela excelente orientação que cada um deles contribuíram, indicando os melhores trajetos e estimulando para o desenvolvimento desse projeto.

Aos professores doutores, Luciano Rodrigues e Pedro Vellasco por todo apoio durante o mestrado, a excelente boa vontade em tirar minhas dúvidas e aos ensinamentos em cada disciplina na fase de créditos.

Agradeço também, ao prof. Manuel Augusto, que não poupou nenhum esforço para ajuda na confecção dos testes e contribuir diretamente para realização do programa experimental.

A todos os amigos e colegas que formei durante o mestrado, em especial, ao Edison Ramalho, Vinicius Baptista, Alan Barile, Felipe Coutinho e Juan Manuel por toda ajuda e paciência durante os estudos e companhia nos momentos de confraternização.

A UERJ, porque sem ela não poderia ter realizado este sonho de conquista.

A todos aqueles, que embora não citados nominalmente, contribuíram direta e indiretamente para a execução deste trabalho.

E a minha namorada e família, principais incentivadores, de palavras de apoio e carinho, por toda confiança e compreensão nos momentos de ausência. Tudo que conquistei e que irei conquistar é fundamentado nos valores e no amor que vocês me propiciaram.

A persistência é o menor caminho do êxito.

Charles Chaplin

RESUMO

PAULA SOBRINHO, Kelvin de. *Avaliação de ligações aparafusadas de aço inoxidável submetida ao corte*. 2019. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

Houve um aumento significativo de pesquisas relacionadas ao uso do aço inoxidável na construção civil considerando análises experimentais e numéricas. Tal fato, está associado as propriedades que esse tipo de material pode proporcionar quando comparado com o aço carbono, tais como, elevada resistência à corrosão, durabilidade, resistência ao fogo, e ao seu grande valor estético. Outro fator que influencia o aumento de pesquisas nessa área diz respeito às normas e códigos vigentes, que de fato, são baseadas por premissas associadas ao aço carbono seguindo regras para o aço conformado a frio e utilizando fatores para reduzir sua elevada capacidade de deformação. O aço inoxidável possui um comportamento estrutural muito distinto. Sua curva tensão *versus* deformação é não linear desde baixos níveis de tensão e sem um patamar definido de tensão de escoamento. Além disso, para cada tipo de aço inoxidável pode se observar diferentes comportamentos, enquanto o aço carbono apresenta um trecho inicial quase linear elástico e com um patamar de escoamento bem definido, que separa de forma consistente a região elástica da região plástica. O propósito do presente trabalho é contribuir com análises experimentais e numéricas a fim de avaliar o desempenho de ligações aparafusadas submetidas ao corte. Os modelos de ligações avaliados são compostos por placas finas de aço inoxidáveis conectadas por um parafuso com um e dois planos de cortes. Comparações com normas e códigos vigentes foram realizadas, assim como, a utilização de métodos propostos por outros autores e pelo novo manual de dimensionamento de aço inoxidável. Nesse trabalho, também foi realizado um estudo sobre a influência dos efeitos *curling* e *pulling into line* na resistência última de ligações aparafusadas, que chegaram a alterar o modo de falha previsto pelos códigos e normas vigentes e reduzir a resistência última das ligações estudadas em até 36% e 25% para os aços austenítico e ferrítico, respectivamente. Como solução para atenuar essa redução, foi estudado a utilização de um reforço composto por placas enrijecidas que impediram o efeito *curling* para ligação com aço ferrítico e minimizaram a redução da carga última para o aço austenítico, chegando a se obter um acréscimo da resistência em até 17%.

Palavras-chave: Ligações aparafusadas; Ensaios experimentais; Análise numérica; Efeito *curling*; Efeito *pulling into line*; Esmagamento da placa.

ABSTRACT

PAULA SOBRINHO, Kelvin de. *Evaluation of bolted connections of stainless steel subjected to shear force*. 2019. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

In the last few years, there was a significant increase in the number of researches related to the use of stainless steel in civil construction, considering both numerical and experimental analysis. This fact is associated with the excellent properties these materials can provide when compared to carbon steel, such as corrosion resistance, durability, fire resistance, and its great aesthetic value. Other factors that influenced the increase of research in this field are related to the current standards and design codes, which are based in analogies associated to carbon steel, following rules for cold formed steel, and using parameters to reduce stainless steel's high deformation capacity. The stainless steel has a very distinct structural behavior, its stress versus strain curve is non-linear from low stress levels and does not present a well-demarcated point of yielding stress, moreover each type of stainless steel presents different behaviors, while the carbon steel presents an initial stress-strain curve almost linear elastic, with a well-defined point of yielding stress that separates the elastic region from the plastic region. The purpose of this work is to contribute with experimental and numerical analysis, aiming to estimate the behavior of bolted connections submitted to tensile forces. The connection FE models evaluated are composed by stainless steel thin plates connected by a bolt with one or two cutting planes. Comparisons with current design codes were carried out, as well as the use of calculation methods proposed by other authors and the new stainless steel design manual. In this paper, a study was also performed to investigate the influence of curling and pulling into line effects in the ultimate strength of the bolted connections, these effects even modified the failure mode estimated by the current design codes and reduced the ultimate strength of the analyzed connections by 36% to 25% for austenitic and ferritic steels, respectively. As a solution to mitigate this reduction, it was studied the use of stiffness plates, that prevented the curling effect and minimized the reduction of the ultimate strength of ferritic steel connections, reaching a 17% increase of the ultimate strength.

Keywords: Bolted connections; Experimental tests; Numerical analysis; Curling effect; Pulling into line effect; Plate Bearing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Obras construídas em aço inoxidável	18
Figura 2 – Preço global dos aços carbono e inoxidáveis [8]	18
Figura 3 – Curva tensão <i>versus</i> deformação típica de alguns aços inoxidáveis e aço carbono. Adaptado de nucleinox.org.br apud SANTOS [12]	21
Figura 4 – Tipos de ligações	21
Figura 5 – Modos de falhas de ligações aparafusadas submetidas ao corte	22
Figura 6 – Efeito <i>curling</i> [9]	23
Figura 7 – Efeito <i>pulling into line</i> [15]	23
Figura 8 – Ruptura por <i>pull-through</i> [18]	24
Figura 9 – Modelo de ligação com dois furos	27
Figura 10 – Pontos considerados para determinação dos modos de falha [18]	31
Figura 11 – Resultados dos modelos I, II e III. [18]	33
Figura 12 – Configuração da ligação aparafusada com 3 parafusos	35
Figura 13 – Região de cisalhamento e tração [28]	39
Figura 14 – Exemplo de linha de ruptura na seção líquida	44
Figura 15 – Tipos de placas ensaiadas	52
Figura 16 – Tipos de ligações estudadas	54
Figura 17 – Nomenclatura utilizada para os testes	55
Figura 18 – Dimensões nominais em mm dos corpos de prova	57
Figura 19 – Máquina utilizada para confecção dos corpos de prova [9]	57
Figura 20 – Máquina Instron 3382 de 100 kN	59
Figura 21 – Caracterização dos CP's austenítico para t = 3 mm	60
Figura 22 – Caracterização dos CP's ferrítico para t = 3 mm	61
Figura 23 – Comparação da caracterização para diferentes espessuras do aço austenítico	61
Figura 24 – Exemplo de CP austenítico e ferrítico após ruptura	62
Figura 25 – Corte e dobragem das placas de aço inoxidáveis	63
Figura 26 – Furação das placas de aço inoxidáveis	64
Figura 27 – Característica do parafuso [38]	64
Figura 28 – Ponto de medição da deformação	65
Figura 29 – Alguns dos testes confeccionados com $e_1 = 32$ mm	66

Figura 30 – Máquina Losenhausen de 600kN e sistema analógico	66
Figura 31 – Instrumentação para medição do deslocamento axial	67
Figura 32 – Medição do efeito curling	67
Figura 33 – Modulo amplificador universal Quantum X-MX1615B [39].....	68
Figura 34 – Interface do programa Catman [39].....	68
Figura 35 – Carga <i>versus</i> deslocamento axial – Austenítico.....	69
Figura 36 – Carga <i>versus</i> deslocamento axial – Ferrítico	69
Figura 37 – Fluxograma utilizado para organização dos resultados	71
Figura 38 – Carga <i>versus</i> deslocamento axial 1º série – Austenítico.....	72
Figura 39 – Ruptura do parafuso do teste D2S-E32-L50-A3.....	73
Figura 40 – Deformada após ruptura da 1º série - Austenítico.....	73
Figura 41 – Carga <i>versus</i> deformação axial e carga <i>versus</i> deslocamento para fora do plano da 1º série.....	74
Figura 42 – Deformada após ruptura do teste D2S-E32-L50-A2.....	75
Figura 43 –Carga <i>versus</i> deslocamento axial 2º série – Austenítico.....	75
Figura 44 – Deformada após ruptura da 2º série - Austenítico.....	76
Figura 45 – Carga <i>versus</i> deformação axial e carga <i>versus</i> deslocamento para fora do plano da 2º série.....	77
Figura 46 – Deformada do teste S2S-E32-L50-A3.....	78
Figura 47 – Carga <i>versus</i> deslocamento axial 3º serie – Austenítico.....	79
Figura 48 – Deformada após ruptura da 3º série - Austenítico.....	79
Figura 49 – Carga <i>versus</i> deslocamento axial da 4º série - Austenítico	80
Figura 50 – Deformada após ruptura da 4º série - Austenítico.....	81
Figura 51 – Ruptura do parafuso do teste S1S-E22-L50-A3.....	81
Figura 52 – Deformada após ruptura do teste S1S-E22-L50-A3.....	82
Figura 53 – Dispositivo utilizado para evitar excentricidades adicionais dos testes S1S e S2S.....	82
Figura 54 – Deformada do teste S2S-E22-L50-A3.....	83
Figura 55 – Ruptura no parafuso do teste D2E-E32-L50-F3.....	84
Figura 56 –Carga <i>versus</i> deslocamento axial 1ºe 3º série - Ferrítico.....	84
Figura 57 – Comparação entre o aço austenítico e ferrítico (DES-E22-L50)	85
Figura 58 – Deformada da 1º série - Ferrítico	86
Figura 59 – Carga <i>versus</i> deformação axial e carga <i>versus</i> deslocamento para fora do plano da 1º série.....	86

Figura 60 – Carga versus deslocamento axial da 2 ^o série - Ferrítico	87
Figura 61 – Deformada após ruptura da 2 ^o série - Ferrítico	88
Figura 62 – Carga <i>versus</i> deformação axial e carga <i>versus</i> deslocamento para fora do plano da 2 ^o série.....	88
Figura 63 – Carga <i>versus</i> deslocamento axial 4 ^o série - Ferrítico	89
Figura 64 – Deformada da 4 ^o série - Ferrítico	90
Figura 65 – Placa de aço carbono.....	91
Figura 66 – Tipos de ligações modeladas no Abaqus	92
Figura 67 – Curva verdadeira <i>versus</i> curva nominal	93
Figura 68 – Condições de contorno	94
Figura 69 – Malha de elementos finitos.....	95
Figura 70 – Ligações do tipo D2S – Austenítico (t = 2mm)	96
Figura 71 – Ligação D2S-E22-L50-A2	96
Figura 72 – Ligação D2S-E32-L50-A2	96
Figura 73 – Ligações do tipo D2E e D2S – Austenítico (t = 3mm)	97
Figura 74 – Ligação do tipo D3S – Austenítico (t = 3mm)	98
Figura 75 – Ligações do tipo S1S – Austenítico.....	98
Figura 76 – Ligações do tipo S2S – Austenítico.....	99
Figura 77 – Ligações do tipo D2E e D2S – Ferrítico	100
Figura 78 – Ligação do tipo D3S – Ferrítico.....	100
Figura 79 – Ligações do tipo S1S e S2S – Ferrítico.....	101
Figura 80 – Comparação da deformada da ligação D2E-E32-L50-A3	102
Figura 81 – Comparação da deformada da ligação D2E-E32-L50-F3	102
Figura 82 – Ligação S2S-E32-L50-A3.....	104
Figura 83 – Comparativo entre as deformações dos testes e modelos numéricos .	108
Figura 84 – Comparação entre a carga <i>versus</i> razão e_1/d das normas e modelos numéricos – Austenítico	110
Figura 85 – Comparação entre a carga <i>versus</i> razão e_1/d das normas e modelos numéricos – Ferrítico.....	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais composições de alguns tipos de aço inoxidável austenítico [10]	19
Tabela 2 – Principais composições de alguns tipos de aço inoxidável ferrítico	20
Tabela 3 – Principais composições de alguns tipos de aço inoxidável duplex	20
Tabela 4 – Parâmetros geométricos para ocorrência do <i>curling</i> [17]	28
Tabela 5 – Propriedades dos materiais obtidas por ensaio de caracterização [22]...	36
Tabela 6 – Resultados das ligações com um plano de corte [22]	36
Tabela 7 – Resultados das ligações com dois planos de cortes [22]	37
Tabela 8 – Comparação entre os resultados [28].....	40
Tabela 9 – Limites inferiores para validação de geometria	42
Tabela 10 – Diâmetro de furos considerado pelas normas AS/NZS [24]	46
Tabela 11 – Modelos de aço inoxidáveis do tipo austenítico	56
Tabela 12 – Modelos de aço inoxidáveis do tipo ferrítico	56
Tabela 13 – Propriedades geométricas dos corpos de provas ensaiados	58
Tabela 14 – Propriedades médias dos CP's	60
Tabela 15– Especificação técnica do parafuso [37]	65
Tabela 16 – Resultados experimentais – Austenítico.....	70
Tabela 17 – Resultados experimentais – Ferrítico	70
Tabela 18 – Propriedade plástica do aço inoxidável	94
Tabela 19 – Comparação entre os resultados – Austenítico	103
Tabela 20 – Comparação entre os resultados – Ferrítico	106
Tabela 21 – Comparação entre o aço austenítico e ferrítico	107
Tabela 22 – Parâmetros geométricos das ligações D2S de aço austenítico.....	109
Tabela 23 – Influência do <i>curling</i> para as ligações D2S e D3S de aço austenítico.	110
Tabela 24 – Influência do <i>curling</i> para as ligações D2S e D3S de aço ferrítico	111

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
ASCE	American Society of Civil Engineers
AS/NZS	Australian/New Zealand Standards
ASTM	American Society for Testing and Materials
CP	Corpo de prova
EN	European Standards
Eurocode	European Committee for Standardisation
ISO	International Organization for Standardisation
LEC	Laboratório de Engenharia Civil
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Técnica Brasileira
SCI	Steel Construction Institute
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro

LISTA DE SÍMBOLOS

A_g	Área bruta da seção transversal da chapa experimental
A_n, A_{net}	Área líquida sujeita a tração
A_{nv}	Área líquida sujeita ao cisalhamento
A_s	Área da seção transversal do parafuso
A_v	Área líquida da seção transversal
b_e	Largura efetiva da placa
C	Coefficiente de esmagamento
d, d_f	Diâmetro do parafuso
d_o	Diâmetro do furo
d_h	Diâmetro de furo com grandes dimensões
d_m	Menor média entre as quinas do hexágono e distância entre chaves da cabeça do parafuso
E	Módulo de Young
e_1	Distância de extremidade
e_2	Distância de bordo
e_{2i}	Distância entre eixo do furo e borda inferior
e_{2s}	Distância entre eixo do furo e borda superior
$f_{0,01}$	Tensão a 0,01% de deformação
$f_{0,2}$	Tensão a 0,2% de deformação
$F_{b,rd}$	Resistência de projeto ao esmagamento
F_N	Resistência última ao modo de falha ruptura na seção líquida (<i>Net-section failure</i>)
F_s	Resistência última ao modo de falha ruptura por corte na placa (<i>Shear failure</i>)
F_t	Tensão última do material na direção perpendicular
f_u	Tensão última do material
$f_{u, red}$	Tensão última reduzida do material
F_{ub}	Resistência última do parafuso
$F_{v,Rd}$	Resistência última de cálculo
f_y	Tensão de escoamento do material

h	Altura do enrijecedor
K	Coeficiente de redução em ligações onde ocorre o efeito <i>curling</i>
L_0	Comprimento de medida original
L_2	Comprimento do enrijecedor
L_c	Comprimento paralelo
n	Parâmetro de Ramberg-Osgood
n_1	Número de parafusos na direção paralela a aplicação do carregamento
n_2	Número de parafusos na direção perpendicular a aplicação do carregamento
$N_{b,frac,pro}$	Resistência última para o modo de falha esmagamento de ligações com placas finas sujeitas a cisalhamento duplo com a chapa central
$N_{b,frac,pro}$ p,c	Resistência última para o modo de falha esmagamento de ligações com dois planos de corte com placas finas de extremidade que controlam o dimensionamento e ligações com placas finas sob um plano de corte
N_f	Carga última para o modo de falha ruptura na seção líquida
N_{ft}	Carga última do modo de falha tração no parafuso
n_n	Número de planos de cortes sobre a rosca
n_t	Número total de parafusos
n_x	Número de planos de cortes fora da rosca
p_1, g	Distância entre eixos dos furos na direção paralela a aplicação do carregamento
p_2	Distância entre eixos dos furos na direção perpendicular a aplicação do carregamento
P_n	Resistência última ao esmagamento
P_{u1}	Resistência última do modo de falha ruptura na seção líquida (<i>net section fracture</i>)
P_{u2b}	Resistência última ao modo de falha <i>Bending fracture</i>
P_{u2s}	Resistência última ao modo de falha <i>Shear-out fracture</i>
P_{utp}	Resistência última de ligações aparafusadas
P_{yes}	Resistência última ao modo de falha <i>Block shear fracture</i>
r	Número de parafusos na seção líquida considerada dividido pelo número total de parafuso

r_f	Relação entre a força transmitida pelo(os) parafuso(os) na seção considerada sobre a força total no membro
s_f	Espaçamento perpendicular entre furos ou a largura da placa para ligações com um parafuso
t	Espessura da placa
u	Constante usada no cálculo da ligação inoxidável
V_b	Carga última do modo de falha esmagamento da placa
V_f	Carga última do modo de falha rasgamento da placa
V_{fv}	Carga última para o modo cisalhamento no parafuso
w	Largura da placa
α	Constante que determina deformação além do escoamento
α_b	Fator de correção em função da tensão última e posicionamento dos parafusos
α_v	Fator que depende da classe do aço
γ_{M0}	Coeficiente de resistência
γ_{M2}	Coeficiente de resistência
ϵ_u	Deformação correspondente a tensão última
ϵ_y	Deformação correspondente a tensão de escoamento
Φ	Diâmetro do furo na placa

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	17
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2 DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES APARAFUSADAS	42
2.1 Eurocode.....	42
2.2 Norma Australiana/Nova Zelândia e Norma Americana.....	46
2.3 Manual de projeto para estrutura de aço inoxidável	49
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	52
3.1 Ensaios experimentais das ligações aparafusadas	52
3.2 Caracterização dos materiais.....	57
3.3 Confeção das placas.....	63
3.4 Instrumentação e sistema de aquisição de dados	65
3.5 Resultados experimentais	69
3.5.1 Austenítico.....	72
3.5.2 Ferrítico	83
4 ANÁLISE NUMÉRICA E DISCUSSÕES.....	91
4.1 Comparação entre os resultados.....	95
4.2 Análises complementares	109
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	113
5.1 Trabalhos Futuros	115
REFERÊNCIAS.....	116

INTRODUÇÃO

Generalidades

Um dos principais motivos que levaram ao tardio uso do aço estrutural no Brasil foram as altas temperaturas necessárias para o seu processo de fabricação, dificultando tanto sua popularização quanto a comercialização [1]. Hoje, o aço estrutural é um dos materiais empregados na construção civil. A sua composição é formada basicamente por ferro e carbono, contendo também algumas impurezas como enxofre e fósforo. Devido ao seu processo de fabricação, outros elementos como níquel, cromo e molibdênio são adicionados para aumentar suas propriedades, tais como, resistência, ductilidade e dureza. Sendo assim, sua classificação se dá basicamente devido a percentagem de carbono, composição química, constituição micro estrutural e aplicação [2], tornando assim, a aplicação do aço carbono estrutural bem disseminado.

A aplicação do aço inoxidável para fins estruturais tem tido a demanda elevada nos últimos anos, principalmente devido ao aumento de pesquisas sobre sua utilização. Esse é um aço de alta liga com dosagem superiores de cromo e níquel, podendo conter também, molibdênio, ferro e outros elementos. O aço inoxidável deve conter pelo menos 10,5% de cromo, sendo suas dosagens variadas para cada classificação. De forma geral, ele é dividido em cinco grupos: austenítico, ferrítico, duplex, e martensítico, endurecido por precipitação [3].

O aço inoxidável já é muito utilizado para situações específicas e apesar de seu alto custo inicial, esse pode proporcionar diversas vantagens relacionadas ao aço carbono, que a longo tempo, pode-se tornar uma solução mais econômica, podendo citar: resistência à corrosão, melhor comportamento à altas temperaturas quando comparado ao aço carbono, maior capacidade de reaproveitamento, ductilidade e resistência ao impacto [4]. Além disso, sua forma arrojada proporciona belas obras de arte. A Figura 1 demonstra algumas aplicações do aço inoxidável no mundo.



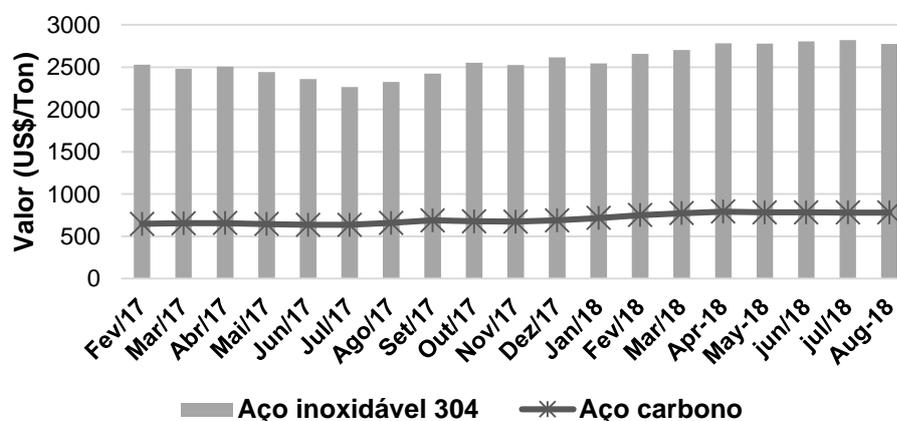
a) Gent Sint Pieters – Belgium [5]



b) Ponte Helix – Singapura [6]

Figura 1 – Obras construídas em aço inoxidável

GEDGE [7] realizou um estudo acerca da aplicação estrutural do aço inoxidável na construção civil, onde é destacado a dificuldade de implementá-lo devido ao seu maior valor comercial quando comparado com o aço carbono. De acordo com o autor, a aplicação do aço inoxidável como elemento estrutural só ocorre quando há fatores preeminentes para sua utilização, tais como, a necessidade de haver resistência à corrosão ou exigências arquitetônicas. Não sendo assim, a sua escolha devido às propriedades que esse aço pode oferecer. A Figura 2 apresenta uma comparação da média mundial do preço, em dólar por tonelada, do aço inoxidável 304 com o aço carbono realizado pela *MEPS International Ltd*. Uma diferença de 364% entre os materiais é encontrada no período considerado [8].

**Figura 2 – Preço global dos aços carbono e inoxidáveis [8]**

Em contraposição, BATISTA [9] aponta que a longo prazo o elevado custo inicial do aço inoxidável pode ser compensado pelo menor número de manutenções e intervenções quando comparado com estruturas de aço carbono, resultando assim, em uma maior durabilidade. E além disso, o aço inoxidável também possui como vantagem o seu valor sustentável, por ser um material reciclável e que não exige manutenção e pintura para a sua proteção.

Segundo GEDGE [7], o aço inoxidável pode ser um material obscuro para alguns projetistas que não estão familiarizados com as ligas. Uma vez que o termo é utilizado para uma extensa família e tipos de ligas, sendo os mais indicados pelo mesmo, em aplicações estruturais, nomeadamente austenítico e o duplex. Dos elementos que compõe o aço inoxidável, a percentagem de cromo é responsável pela resistência à corrosão, sendo essa característica melhorada com o acréscimo de molibdênio e nitrogênio. Já o níquel é adicionado, principalmente, para garantir a microestrutura correta e suas propriedades mecânicas. Alguns exemplos de aços inoxidáveis do tipo austenítico com a nomenclatura europeia, classificado pela EN10088 [10], são apresentados na Tabela 1. Em detalhes, é demonstrado a percentagem dos principais elementos que compõe a estrutura do aço.

Tabela 1 – Principais composições de alguns tipos de aço inoxidável austenítico [10]

Designação do aço		Composição mínima da liga (%)		
(EN10088)	AISI/ASTM	Cromo	Níquel	Molibdênio
1.4301	304	17,5 - 19,5	8,0 - 10,0	-
1.4404	316 L	16,5 -18,5	10,0 - 13,0	2,0 - 2,5
1.4435	316 L	17,0 - 19,0	12,5 - 15,0	2,5 - 3,0

A Tabela 2 apresenta a composição do aço inoxidável do tipo ferrítico, que também possui grande aplicação na construção civil [4]. Já o duplex é uma mistura da microestrutura do ferrítico e austenítico. Alguns exemplos são demonstrados na Tabela 3, onde é apresentado os aços 1.4162 e 1.4362 de baixa liga, *lean duplex*, que possuem resistência análoga aos duplex, porém com menor resistência a corrosão quando comparada com o austenítico.

Tabela 2 – Principais composições de alguns tipos de aço inoxidável ferrítico
[10]

Designação do aço		Composição mínima da liga (%)		
(EN10088)	AISI/ASTM	Cromo	Níquel	Molibdênio
1.4003	-	10,5 - 12,5	0,3 - 1,0	-
1.4016	430	16,0 - 18,0	-	-
1.4512	409	10,5 - 12,5	-	-

Tabela 3 – Principais composições de alguns tipos de aço inoxidável duplex
[10]

Designação do aço		Composição mínima da liga (%)			
(EN10088)	AISI/ASTM	Cromo	Níquel	Molibdênio	Nitrogênio
1.4462	2205	21,0 - 23,0	4,5	2,5	0,1 - 0,2
1.4410	2507	24,0 - 26,0	6,0 - 8,0	3,0 - 4,5	0,2 - 0,4
1.4362	2304	22,0 - 24,0	3,5 - 5,5	0,1 - 0,6	0,1 - 0,2
1.4162	-	21,0 - 22,0	1,4 - 1,7	0,1 - 0,8	0,2 - 0,3

O aço inoxidável possui um comportamento estrutural distinto quando comparado ao aço carbono, sua curva tensão *versus* deformação não linear e sem um ponto bem definido de tensão de escoamento e encruamento do material torna sua aplicação ainda mais complexa. A Figura 3 apresenta um gráfico comparativo entre alguns aços inoxidáveis com o aço carbono. Outra propriedade mecânicas do aço inoxidável apresentadas por GEDGE [7] é seu alto grau de capacidade de deformação entre a tensão de escoamento e tensão última, adquirindo assim, uma elevada tenacidade.

FREIRE [11] indica também, que o aço inoxidável possui um comportamento anisotrópico, que é composto por quatro curvas de tensão *versus* deformação, quando solicitado à compressão ou à tração no sentido perpendicular ou paralelo a laminação, modificando assim, o comportamento global da estrutura. Uma pequena abordagem quanto a diferença entre o comportamento de tração para diferentes ângulos entre o sentido do carregamento e laminação do aço austenítico e ferrítico será apresentado nessa dissertação.

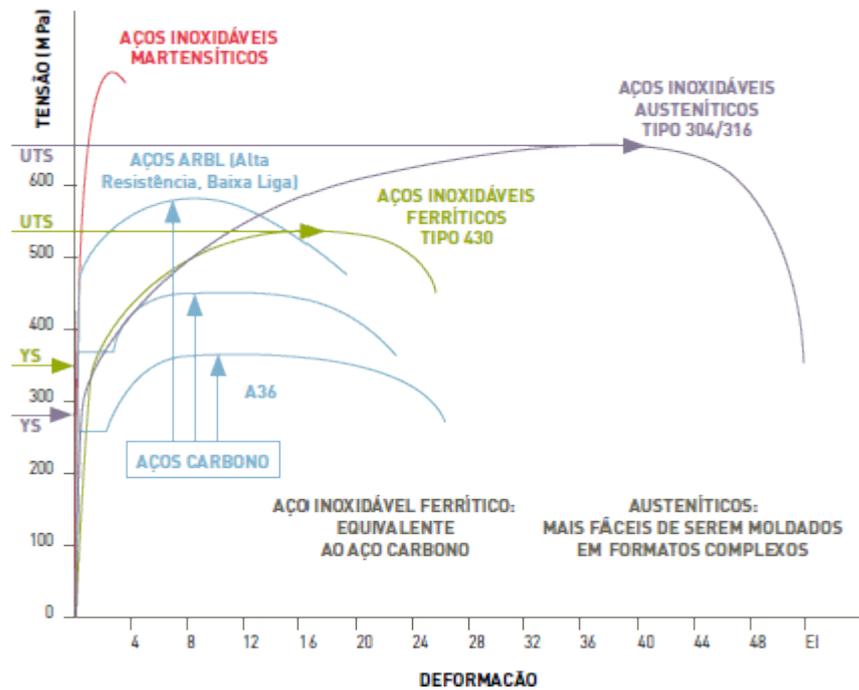
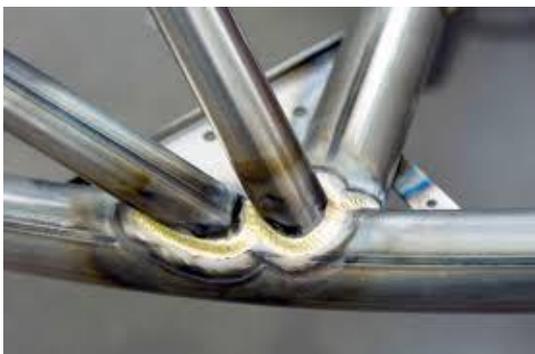


Figura 3 – Curva tensão *versus* deformação típica de alguns aços inoxidáveis e aço carbono. Adaptado de nucleinox.org.br apud SANTOS [12]

A ligação exerce um papel muito importante em qualquer estrutura, pois tem como função principal transmitir os esforços entre os elementos estruturais. Hoje, os tipos de ligações mais empregadas são as soldadas e aparafusadas. No passado, ligações realizadas por rebites eram muito comuns. Na Figura 4, são apresentados exemplos de ligações, em (a) uma ligação do tipo soldada em uma estrutura de aço inoxidável e em (b) exemplos de ligações aparafusadas em uma estrutura de aço carbono.



(a) Ligação soldada [13]

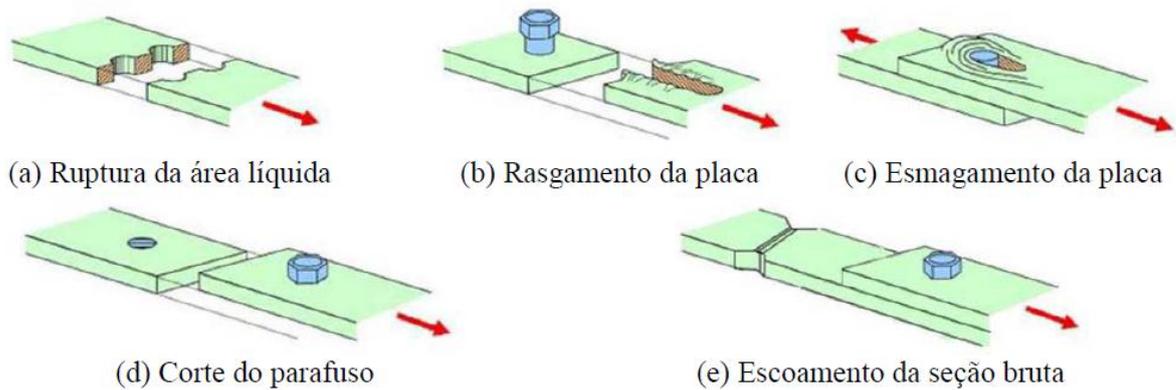


(b) Ligação aparafusada [14]

Figura 4 – Tipos de ligações

Pode-se apontar como desvantagens de uma ligação aparafusada: diminuição da seção transversal do elemento, devido a furação que conseqüentemente, diminui a sua resistência e modifica o seu comportamento quando sujeito a solicitações; e necessidade de um controle de qualidade mais rigoroso, de forma a evitar possíveis erros de montagem por furação descasadas. Já para as ligações soldadas, pode-se citar como desvantagens a questão relacionada ao aumento do custo de execução devido a uma exigência maior de tempo na montagem, mão de obra especializada e controle de qualidade que deve ser realizado em campo para garantir a eficiência da solda [11].

Na presente dissertação é avaliado o comportamento de ligações aparafusadas sujeito ao corte, sendo os modos de falhas mais comuns para esse tipo de ligação apresentados na Figura 5.



**Figura 5 – Modos de falhas de ligações aparafusadas submetidas ao corte
Adaptado de SANTOS (2014) apud BATISTA [9]**

Na Figura 5 (a) é observado o modo de falha ruptura da área líquida, onde ocorre o rasgamento da seção transversal da placa na região efetiva, devido a ocorrência de furo(s) na linha de ruptura considerada. No item (b), ocorre a falha devido à pequena distância entre o furo da placa e sua extremidade, onde acontece o rasgamento devido às tensões cisalhantes geradas pelos fuste do parafuso. Em (c), é apresentado o modo de falha esmagamento da placa pelo parafuso, análogo ao modo de ruptura anterior, porém a distância entre o furo da placa e extremidade é o suficiente para que não ocorra o seu rasgamento. Já no item (d), é demonstrado a ruptura no parafuso em um plano de corte, devido à resistência insuficiente do parafuso ao cisalhamento causado pelas placas. Por fim, é exposto o modo de falha

escoamento da seção bruta, que ocorre quando é atingido a tensão de escoamento na seção transversal bruta da placa, gerando assim, uma plastificação generalizada na seção [11].

Associado ao modo de falha relativo ao esmagamento da placa (ver Figura 5.c), em ligações com placas finas podem ocorrer o efeito *curling*. Este é devido a deformação de compressão na região de extremidade da ligação, como essa parte da placa se encontra fixa em uma extremidade pela cabeça do parafuso ou pela porca, e no outro extremo livre, ocorre a deformação para fora do plano [15]. Tal fenômeno possui maior relevância em ligações com distância elevada entre o eixo do furo e a extremidade da placa no sentido de aplicação do carregamento. Em materiais com grande capacidade de deformação, como aço inoxidável, esse efeito é ainda maior [16]. A Figura 6 apresenta um esquema de uma ligação que ocorre o efeito *curling*.

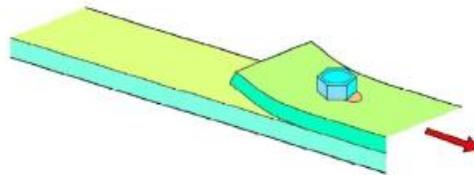


Figura 6 – Efeito *curling* [9]

Como já descrito, esta dissertação também contemplará o efeito/fenômeno *pulling into line* ou também conhecido como “efeito de flexão secundária” [17], que ocorre em placas finas com o parafuso sob um plano de corte, onde ocorre o *curling* nas extremidades das placas e a força de tração tende a atuar em uma única linha, conforme apresentado na Figura 7. [15]

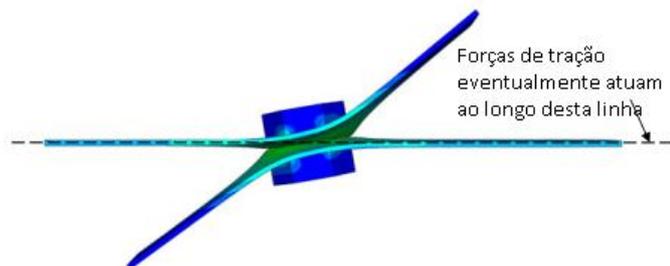


Figura 7 – Efeito *pulling into line* [15]

Devido a ocorrência do efeito *pulling into line*, a ligação poderá romper por *pull-through*, que é o rasgamento da placa para fora do plano devido ao esmagamento ocasionado pela cabeça do parafuso ou porca. A figura 8, apresenta um desenho esquemático desse tipo de ruptura em uma ligação de duplo corte.

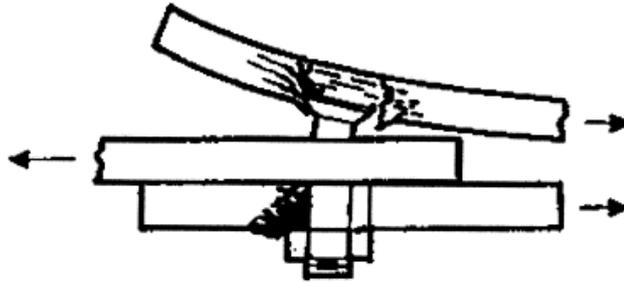


Figura 8 – Ruptura por *pull-through* [18]

Nesse trabalho, é dissertado o comportamento de dois tipos de aço inoxidáveis, austenítico e ferrítico, onde por meio de um estudo experimental e numérico foi possível compreender o comportamento desses materiais quando submetidos ao corte.

Motivação

Faz-se necessário buscar soluções estruturais mais econômicas e sustentáveis. Para tanto, o aço inoxidável pode ser uma alternativa disponível no mercado. Sua durabilidade, valor agregado para reciclagem, e segurança química por não haver necessidade de pintura são fatores preponderantes que o tornam sustentável para o meio ambiente. Quanto ao seu custo elevado, quando comparado com aço carbono, poderá ser reduzido quando suas propriedades mecânicas forem consideradas para a análise do ciclo de vida da construção.

Logo, a presente dissertação tem como motivação explorar as propriedades e o comportamento dos aços inoxidáveis do tipo ferrítico e austenítico em aplicação de ligações aparafusadas, considerando sua real capacidade de resistência, que não são consideradas pelos códigos e normas de aço inoxidáveis vigentes. E assim, contribuir com a comunidade científica com objetivo de atualizar, ou consolidar, as premissas

que estão sendo aplicadas em projetos de estruturas metálicas usando ligações aparafusadas em aço inoxidável.

Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal apresentar o comportamento de ligações aparafusadas com placas de aço inoxidáveis do tipo austenítico 304 e ferrítico 430, conectadas por um parafuso com um e dois planos de cortes, por meio de um estudo experimental e numérico. O estudo de algumas variáveis que influenciam no comportamento do efeito *curling* é realizado, onde ligações com a utilização de enrijecedores são analisadas com o objetivo em minimizar a influência do fenômeno (*curling*) na resistência última de ligação aparafusadas. Uma pequena abordagem do comportamento desses tipos de aço inoxidáveis para diferentes ângulos entre o sentido do carregamento e laminação do material também é apresentado. Todos os resultados encontrados são comparados com os valores previstos pelas normas vigentes, conclusões e formulações propostas por outros autores na literatura.

Estrutura da dissertação

Na primeira parte desta dissertação foi apresentado um capítulo introdutório sobre os principais conceitos relativos a ligações aparafusadas, bem como, os seus principais modos de ruptura, e ainda, uma breve descrição sobre o aço inoxidável. Como um dos objetivos desse trabalho é avaliar a influência do efeito *curling* e *pulling into line* na resistência última da ligação, é apresentado também uma introdução do que vem a ser cada um desses fenômenos. No final, estão contidos a motivação bem como o objetivo para realização dessa dissertação.

O capítulo um, apresenta inicialmente uma revisão bibliográfica sobre a linha de pesquisa apresentada, contendo formulações e conclusões encontradas por diversos autores da literatura.

No segundo capítulo, é descrito as considerações das normas e códigos vigentes relacionados a ligações aparafusadas de aço inoxidável, onde são descritas as principais diferenças entre elas.

No terceiro capítulo, é apresentado o programa experimental contendo a preparação e instrumentação necessária para realização de cada ensaio. Uma descrição dos equipamentos utilizados e procedimentos também são abordados. O final do capítulo é composto pelos resultados encontrados nos experimentos.

O quarto capítulo contém as principais abordagens utilizadas para realização dos modelos numéricos, onde apresenta uma comparação entre os resultados encontrados no programa de elementos finitos e seus respectivos modelos do capítulo anterior, como também com os códigos e normas vigentes. Ao final deste capítulo, é apresentado vinte análises numéricas complementares, que tem como objetivo expandir o estudo de ligações aparafusadas de aço inoxidáveis, com algumas variações de parâmetros que influenciam na ocorrência do efeito *curling*.

Por fim, o sexto e último capítulo, possui uma série de comentários finais a respeito da pesquisa e conclusões encontradas.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, é abordado, em ordem cronológica, os trabalhos relacionados a linha de pesquisa desta dissertação. Estudos realizados por diversos autores demonstram que a utilização de análises em elementos finitos é capaz de representar o comportamento de ligações aparafusadas com grande precisão nos resultados, sendo assim, é possível analisar a carga última e o modo de falha de cada modelo com grande quantidade de informações e com um custo bem reduzido.

Por meio de um estudo paramétrico realizado no software Abaqus versão 6.4, KIM et al. [19] analisaram o comportamento de ligações aparafusadas de aço inoxidável do tipo austenítico, sendo essa composta por dois parafusos no sentido paralelo ao carregamento sob cisalhamento simples. Tal estudo teve como variáveis a distância entre o eixo do furo e extremidade da placa no sentido de aplicação da força, e_1 , a distância entre o eixo do furo e extremidade lateral da placa (sentido perpendicular ao carregamento), e_2 , e a espessura da placa, t , que são variáveis que influenciam na ocorrência do efeito *curling*. A Figura 9 apresenta um modelo da ligação estudada, com a marcação das variáveis e_1 e e_2 .



Figura 9 – Modelo de ligação com dois furos

KIM et al. [19] utilizou as equações propostas por KIM, KUWAMURA E CHO em 2008, sendo observado uma melhor precisão em estimar a carga última das ligações quando comparadas pelas previsões de normas vigentes. Logo, KIM et al. [19] propuseram uma modificação para as equações proposta por KIM, KUWAMURA E CHO em 2008, de modo, que seja considerado a influência do efeito *curling* na carga última de ligações aparafusadas, uma vez que as equações não foram projetadas para considerar a influência desse fenômeno e superestimava o valor real da resistência da ligação. Tal equação modificada é apresentada mais adiante.

O estudo paramétrico realizado por KIM et al. [19] foi composto por 115 modelos numéricos com variação da espessura de 1,5 mm, 3,0 mm, e 6,0 mm, como também uma variação das distâncias e_1 e e_2 na faixa de $1,5d$ a $5d$, onde d é o diâmetro do parafuso. Com base nos resultados obtidos, os autores perceberam que o efeito *curling* com a ligação, conforme o arranjo descrito acima, ocorre de acordo com cada espessura apresentada na Tabela 4 [19].

Tabela 4 – Parâmetros geométricos para ocorrência do *curling* [19]

Espessura da placa t [mm]	Distância de extremidade e_1 [mm]	Distância de bordo e_2 [mm]
1,5	$\geq 1,5d = 12t = 18$	$\geq 2,0d = 16t = 24$
3,0	$\geq 2,5d = 10t = 30$	$\geq 2,5d = 10t = 30$
6,0	$\geq 4,0d = 8t = 42$	$\geq 4,0d = 8t = 42$

KIM et al. [19] observaram que nas ligações sujeitas ao modo de falha ruptura na seção líquida, a resistência última da ligação cresce linearmente com o aumento da razão e_2/d até o surgimento do efeito *curling*. Após o aparecimento desse fenômeno a resistência da ligação quase que permanece constante. Para ligações sujeito ao modo de falha rasgamento da placa (*end opening fracture*), o mesmo acontece quando aumenta a razão e_1/d . A ocorrência e magnitude da influência do efeito *curling* na resistência última da ligação está associado a espessura da placa, a distância e_1 e a distância p_1 . Sendo para os arranjos descritos, tal fenômeno reduziu em média a resistência última das ligações em 11%, 16% e 14% para as placas com 1,5 mm, 3,0 mm e 6,0 mm, respectivamente.

Sendo assim, KIM et al. [19] propuseram a Equação (1) para determinar a carga última de ligações aparafusadas, P_{utp} , sendo válida para o aço inoxidável do tipo austenítico, contendo dois parafusos no sentido paralelo ao carregamento sob um plano de corte, com as seguintes restrições geométricas: espessura da placa de 1,5 a 6 mm; distância e_1 e e_2 de 12 a 60 mm; e uma distância p_1 e p_2 de 30 mm.

$$P_{utp} = K \cdot P_{ut} \quad (1)$$

onde, K é o coeficiente de redução em ligações onde ocorre o efeito *curling*, como apresentado na Tabela 4, que é igual a 0,86, e para os demais casos a constante deve ser tomado como 1; P_{ut} é a carga correspondente ao modo de falha determinado pelas

Equações (2), (5), (6) e (7) propostas em estudos anteriores realizados por KIM, KUWAMURA E CHO em 2008. Sendo a Equação (2) utilizada para determinação da carga correspondente a falha ruptura na seção líquida (*net section fracture*).

$$P_{u1} = b_e t F_u \quad (2)$$

onde, b_e é a largura de influência do *curling* em ligações com dois parafusos no sentido de aplicação da força, sendo calculado pela Equação (3).

$$b_e = 4d \rightarrow b_e \leq w - d_0 \quad (3)$$

em que w é a largura total da placa e d_0 o diâmetro do furo da placa.

Quando o efeito *curling* não ocorre (fora do intervalo dado pela Tabela 4) b_e é igual a área líquida da seção transversal ($b_e = b_n$), sendo b_n calculado conforme a Equação (4).

$$b_n = w - d_0 \quad (4)$$

Para o rasgamento da placa, KIM et al. [19] dividiu o modo de falha em dois: *bending fracture* e *shear-out fracture*. Para o primeiro, que é derivado de uma viga equivalente e o vão de flexão da placa, é utilizado a Equação (5).

$$P_{u2b} = n_t \frac{t}{2} \left[e_0 + \left(1 + \frac{p_2 + d_0}{4e_0} \right) g_0 \right] f_u \quad (5)$$

onde, $n_t = n_1 \cdot n_2$, sendo n_t o total de parafusos, n_1 o número de parafusos na direção de aplicação da força e n_2 o número de parafusos no sentido perpendicular a mesma força; $e_0 = \frac{d_0}{2}$ e $g_0 = p_2 - d_0$, sendo p_2 o espaçamento entre eixos dos furos no sentido transversal ao carregamento. Tal equação é válida para ligações com dois parafusos próximos a borda e para, p_2 , menor do que e_0 .

Já para a segunda parte da divisão, *shear-out fracture*, é utilizado a Equação (6). Para esse modo de falha, não se aplica o coeficiente de redução devido ao efeito *curling* e a resistência última da ligação é determinada pela Equação (6).

$$P_{u2s} = n_t \frac{2e_1 t}{\sqrt{3}} f_u \quad (6)$$

onde, $e_1 = \text{mínimo}[e, 13t, p_1]$, sendo p_1 a distância entre eixos de dois parafusos no sentido de aplicação da força, e_1 é a distância entre o eixo do parafuso e a extremidade da placa no sentido do carregamento e f_u a tensão última do material.

Outro modo de falha, ruptura por cisalhamento em bloco (*block shear fracture*), proposto por KIM, KUWAMURA E CHO em 2008, é apresentado na Equação (7):

$$P_{yes} = \frac{2}{\sqrt{3}} e_1 t f_y \quad (7)$$

onde, f_y é a tensão de escoamento.

SALIH, GARDNER e NETHERCOT [15] realizaram uma investigação específica em ligações aparafusadas de aço inoxidável, do tipo austenítico (classe 1.4306) e ferrítico (classe 1.4016), onde foi avaliado o comportamento de placas finas e espessas sujeitas ao modo de falha esmagamento da placa. No estudo foram realizadas análises numéricas com o software Abaqus 6.7. Com os modelos numéricos validados foi realizado uma análise paramétrica para investigar as principais variáveis que afetam o modo de falha em questão, sendo: e_1 , e_2 e t . O estudo realizado mostrou que o comportamento do aço inoxidável não difere-se tanto do aço carbono, sendo que o primeiro apresenta um grande encruamento por deformação [20].

O início da fratura apresentado pelos modelos numéricos coincidiram com o observado por SALIH, GARDNER e NETHERCOT [15] nos ensaios experimentais, tanto para as ligações de aço carbono quanto para as de aço inoxidável, garantindo assim, a consistência dos modelos numéricos baseados no critério de resistência ao esmagamento de placas de aço inoxidável. Os resultados encontrados no estudo paramétrico foram utilizados como base para definir um critério de resistência baseado no estado limite último e no estado limite de serviço. Tal critério se mostrou mais econômico do que as provisões dada pelo Eurocode 3, parte 1.4 [21].

E com esses resultados foi observado que independente da relação e_1/d_0 a carga de pico da ligação corresponde a fratura devido ao maior alongamento que ocorre em dois pontos simétricos de aproximadamente $\pm 45^\circ$ com a horizontal (sentido de aplicação da carga).

Para prever os modos de falha foi correlacionado o deslocamento de 6 pontos que quando comparados com as coordenadas iniciais é determinado 5 tipos de alongamento. Na figura abaixo é apresentado a posição de cada ponto considerado.

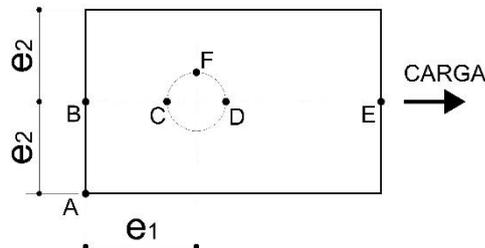


Figura 10 – Pontos considerados para determinação dos modos de falha [20]

O alongamento dado pelos pontos C-E representa o alongamento global da ligação, que por sua vez é influenciado pelos próximos três tipos que serão abordados, sendo o maior destes, valor relativo na direção de aplicação da força, o que representa o modo de falha da conexão. O alongamento dado pelos pontos A-B representa o modo de falha cisalhamento em bloco, que ocorre em ligações com a distância e_1 reduzida. Os pontos B-C, quando possuem uma distância elevada, induz ao modo de falha esmagamento na parede do furo. Já a distância entre D-F, corresponde a ruptura na área líquida, uma vez que a deformação correspondente dessa medida representa metade da deformação na seção líquida. E por fim, o alongamento dado pelos pontos D-E corresponde a plastificação da seção bruta, sendo esse último não determinante em nenhum dos modelos realizados por SALIH, GARDNER e NETHERCOT [15]. As espessuras das placas utilizada no estudo paramétrico foram de 1, 2, 4, 8 e 10 mm; tais valores foram escolhidos para analisar o comportamento de ligações com placas finas (1 e 2 mm) cobertas pelo Eurocode 3, parte 1.3 [22], a transição de 4 mm, limite coberto pelo mesmo código, e placas consideradas espessas (8 e 10 mm). Nesse estudo três tipos de arranjos de ligações foram realizados, sendo: conexões entre placas espessas com dois planos de corte, onde a central controla o dimensionamento; ligações com cisalhamento duplo usando placas finas na extremidade (crítica) e uma placa central espessa; e ligações com cisalhamento simples entre duas placas finas.

Analísado os resultados obtidos pelas placas espessas, SALIH, GARDNER e NETHERCOT [15] compararam a perda de rigidez de dois tipos de ligações, uma

sujeito ao modo de falha esmagamento e outra a ruptura na seção líquida, ambas para um critério de deslocamento de 3 mm e 6,35 mm. Os autores concluíram que a utilização de um critério de deslocamento, com esses valores, não representaria a real capacidade de ligações de aço inoxidáveis, já que a rigidez da ligação com um deslocamento de 6,35 mm para o modo de falha esmagamento é aproximadamente 50% da rigidez correspondente ao deslocamento de 3 mm. E para o modo de falha ruptura na seção líquida, a rigidez na ruptura representa 25% da correspondente ao deslocamento de 6,35 mm e 12% da correspondente ao deslocamento de 3 mm. Contudo, a perda da rigidez para ligações sujeitas ao modo de falha esmagamento é relativamente inferior a das ligações do modo de falha ruptura na seção líquida, que possui uma resistência de projeto baseada na ruptura.

Para avaliar a influência do efeito *curling* na resistência última das ligações, SALIH, GARDNER e NETHERCOT [15] realizaram três tipos de configurações para as análises numéricas, em que as placas que controlam o dimensionamento possuíam uma espessura de 2 mm. O modelo I é uma ligação com dois planos de corte, sendo as de extremidades as críticas, com condições de contorno necessárias para impedir o efeito *curling*. No modelo II, trata-se de uma ligação com o mesmo arranjo da anterior, porém com a presença do efeito *curling* nas placas de extremidades. O terceiro e último modelo (III), é uma ligação simples com placas finas de mesma espessura. Com os resultados encontrados para as ligações com placas finas, apresentado na Figura 11, o autor chegou nas seguintes conclusões:

1. O efeito *pulling into line*, flexão na placa induzida pela excentricidade de uma placa sob a outra, que ocorre apenas em ligação de placas finas com cisalhamento simples, não impede o modo de falha esmagamento da placa, tornando os sistemas II e III equivalentes.
2. Comparando os resultados mencionados no tópico anterior com o modelo I o autor concluiu que o efeito “*curling*” reduz consideravelmente a capacidade última da ligação.
3. Devido à instabilidade nos modelos de ligações com cisalhamento simples e conseqüentemente, a obtenção de soluções complexas, no estudo paramétrico foi utilizado ligações com dois planos de cortes para representar o mesmo efeito das ligações com um plano de corte.

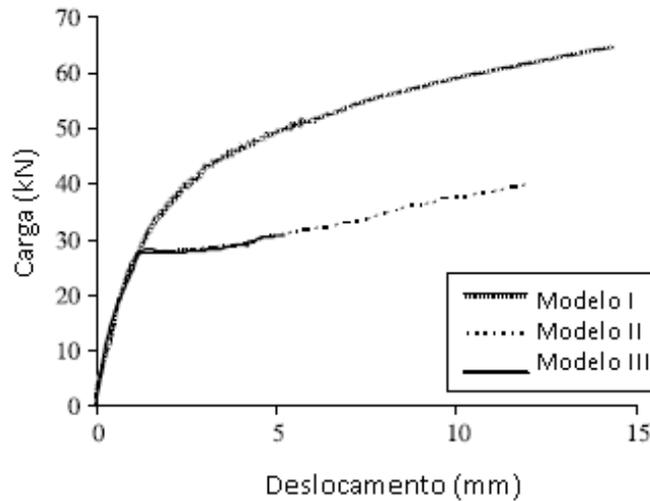


Figura 11 – Resultados dos modelos I, II e III. [20]

Com base em todo o estudo paramétrico realizado pelos autores, foram propostos as Equações (8), (10) e (12), que segundo eles apresentaram resultados mais consistentes e são mais simples de serem utilizadas. Para facilitar a comparação, suas variáveis possuem a mesma nomenclatura das fornecidas pelo Eurocode 3, parte 1.8 [23], sendo que para a resistência última do material, f_u , não é utilizado o valor reduzido, $f_{u,red}$, dado pelo Eurocode 3, parte 1.4 [21]. Os autores também julgaram semelhantes o comportamento do aço inoxidável austenítico e ferrítico, sendo assim, a equação é válida para ambos os materiais. Logo abaixo, são apresentados as equações propostas para a determinação da resistência ao esmagamento.

Para ligações com placas espessas e para ligações com placas finas sujeitas a cisalhamento duplo com a chapa central sendo a crítica, é utilizado na Equação (8).

$$N_{b,frac,prop} = \alpha_1 \cdot t \cdot d \cdot f_u \quad (8)$$

onde α_1 é calculado pela Equação (9).

$$\alpha_1 = 2,5 \left(\frac{e_1}{3d_0} \right) \leq \begin{cases} 2,5 & \text{para } \frac{e_2}{d_0} > 1,5 \\ 2,0 & \text{para } \frac{e_2}{d_0} \leq 1,5 \end{cases} \quad (9)$$

Para ligações com dois planos de corte com placas finas de extremidade que controlam o dimensionamento e ligações com placas finas sob um plano de corte é utilizado na Equação (10).

$$N_{b,frac,prop,c} = \alpha_3 \cdot t \cdot d \cdot f_u \quad (10)$$

onde α_3 é calculado pela Equação (11),

$$\alpha_3 = 1,6 \left(\frac{e_1}{2d_0} \right) \leq 1,6 \quad (11)$$

Para ligações em que é necessário controlar a deformação baseada em um estado limite de serviço a Equação (12) foi julgada satisfatória pelo autor.

$$N_{b,def,prop} = \alpha_2 \cdot t \cdot d \cdot f_u \quad (12)$$

onde α_2 é determinado pela Equação (13).

$$\alpha_2 = 1,25 \left(\frac{e_1}{2d_0} \right) \leq 1,25 \quad (13)$$

YANCHENG e YOUNG [24] estudaram ligações aparafusadas em aço inoxidável conformados a frio, onde foi avaliado o comportamento dessas ligações para três tipos de aço inoxidável: o austenítico EN 1.4301 (AISI 304); austenítico EN 1.4571 (AISI 316Ti), que possui menor percentagem de titânio; e o *lean duplex* EN 1.4162 (AISI 32101). Para cada aço estudado foi feito um ensaio de caracterização. E para a realização dos testes, foram analisadas ligações com um e dois planos de cortes, onde houve uma variação em cada um desses em cinco tipos de configurações, alterando o número de parafusos e o seu diâmetro. Os resultados encontrados foram comparados com os modos de falhas e a resistência nominal prevista pelas normas de aço inoxidáveis vigentes *American Society of Civil Engineers Specification – ASCE 8-02* [25], *Australiana/Nova Zelândia 4673* [26], *Eurocode 3, parte 1.4* [21]. Para evitar o efeito *curling*, foi deixado um enrijecedor no corte das amostras proveniente do perfil tubular, onde foi utilizado uma altura de 1/5 da largura nominal das amostras, resultando em uma altura, h , do enrijecedor de 10 mm; para o

seu comprimento, L_2 , foi utilizado o valor correspondente a soma de $2e_1 + p_1$. Os autores concluíram que esta medida seria interessante, pois pesquisadores verificaram que esse efeito pode afetar o modo de falha das ligações e o mesmo não representa o comportamento real de conexões com placas dobradas, tal como, perfis do tipo “C”. A configuração das placas externas para as ligações com dois planos de cortes, são idênticas a das ligações com um plano de corte para uma mesma disposição de parafusos. Um modelo de uma placa com a configuração de três furos é apresentado na Figura 12 [27], [28].

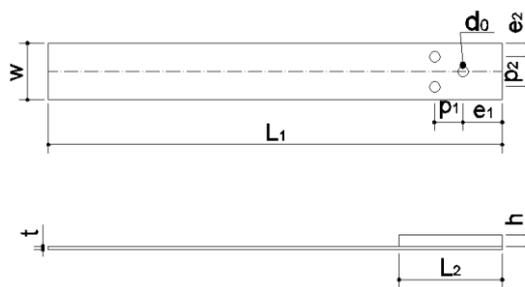


Figura 12 – Configuração da ligação aparafusada com 3 parafusos

Os ensaios de caracterização de YANCHENG e YOUNG [24] foram realizados por deslocamento com uma taxa de carga constante de 0,5 mm/min, em que os extensômetros mediram uma deformação de 0.0002/s (a norma Australiana 1391 [29] especifica uma faixa de 0.00025 a 0.0025). Para cada ensaio foi obtido a tensão de escoamento a 0,2 % de deformação e a sua tensão última, sendo obtido a tensão estática e dinâmica para cada uma dessas. O termo denominado estático representa a tensão encontrada com uma pausa na aplicação do deslocamento de 1,5 min, permitindo assim, o relaxamento da tensão associado a deformação plástica do material. Já o termo dinâmico foi utilizado para a tensão obtida com a aplicação constante do deslocamento. Além disso, foi determinado também o parâmetro “n” de Ramberg-Osgood, que determina a parte inicial da não linearidade da curva, utilizando a Equação (14).

$$n = \frac{\ln(0.01/0.2)}{\ln(f_{0.01}/f_{0.2})} \quad (14)$$

em que $f_{0.01}$ é a tensão medida a 0,01% de deformação e $f_{0.2}$ a 0,2%.

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização por YANCHENG e YOUNG [24] são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades dos materiais obtidas por ensaio de caracterização [24]

Serie de teste	Tipo	E [GPa]	Estática			Dinâmica			Deformação [%]
			$f_{0,2}$	f_u	n	$f_{0,2}$	f_u	n	
			[MPa]	[MPa]		[MPa]	[MPa]		
A	EN1.4301(AISI304)	199	438	720	5	474	759	5	52,6
T	EN1.4571(AISI316Ti)	199	444	648	8	463	677	7	46,8
L	EN1.4162(AISIS32101)	200	675	813	4	724	862	7	36,8

No total, foram realizados 49 ensaios de ligações aparafusadas, sendo deste montante, 15 repetições. Nessa dissertação, são apresentados apenas os resultados para as ligações com um parafuso, que é o objeto de estudo deste projeto, sendo demonstrado na Tabela 6 os correspondentes a ligação com um plano de corte e na Tabela 7 das ligações com dois planos de cortes. Para identificação das principais variáveis de cada teste, foi utilizado uma nomenclatura em que o primeiro algarismo, representa o tipo de aço, o segundo se é uma ligação de corte simples ou duplo, o terceiro o número de parafusos e o último o seu diâmetro.

Tabela 6 – Resultados das ligações com um plano de corte [24]

Amostra	Teste		Comparação				Modo de falha previsto	
	P_{exp} [kN]	Modo de Falha	Propriedades estática		Propriedades dinâmica		ASCE/AS/NZS	EC
			$P_{Exp}/P_{ASCE/AS/NZS}$	P_{Exp}/P_{EC}	$P_{Exp}/P_{ASCE/AS/NZS}$	P_{Exp}/P_{EC}		
A-S-1-10	29,5	B	1,46	2,09	1,38	1,97	NS	B
A-S-1-12	34,9	B	1,52	2,02	1,44	1,90	NS	B
T-S-1-12	31,8	B	1,54	1,96	1,48	1,88	NS	B
L-S-1-10	29,9	B + BS	1,27	1,66	1,20	1,57	NS	B
L-S-1-12	37,1	B	1,41	1,69	1,33	1,59	NS	B
Média			1,44	1,88	1,37	1,78		
Desvio Padrão			0,108	0,197	0,109	0,188		
Coef. de Variação			0,075	0,104	0,080	0,105		

Tabela 7 – Resultados das ligações com dois planos de cortes [24]

Amostra	Teste		Comparação				Modo de falha previsto	
	P _{exp} [kN]	Modo de Falha	Propriedades estática		Propriedades dinâmica		ASCE/ AS/NZS	EC
			P _{Exp} /P _{ASCE/AS/NZS}	P _{Exp} /P _{EC}	P _{Exp} /P _{ASCE/AS/NZS}	P _{Exp} /P _{EC}		
A-D-1-12	38,5	B	1,68	1,36	1,56	1,28	NS	B
T-D-1-12	35,3	B	1,51	1,32	1,45	1,26	NS	B
T-D-1-12-R	33,3	B	1,42	1,24	1,36	1,18	NS	B
L-D-1-12	45	B	1,26	1,29	1,17	1,3	NS	B
L-D-1-12-R	47,1	B	1,33	1,36	1,24	1,37	NS	B
Média			1,44	1,31	1,36	1,28		
Desvio Padrão			0,164	0,051	0,157	0,069		
Coef. de Variação			0,114	0,039	0,116	0,054		

Com os resultados apresentados, YANCHENG e YOUNG [24] concluíram que para os dois tipos de ligações as três normas apresentaram valores de forma geral, mais conservadores, sendo que para as ligações com apenas um plano de corte, esses valores foram os mais distantes, e das três normas, as formulações do Eurocode 3, parte 1.4 [21] chegou a valores mais próximos aos obtidos nos ensaios experimentais para as ligações com dois planos de cortes. E quanto aos modos de falhas previstos, a norma europeia também apresentou uma precisão maior.

Apesar do Eurocode 3, parte 1.4 [21] ter sido mais preciso, os valores fornecidos pela equação da norma Australiana/Nova Zelândia 4673 [26] para ligações com um parafuso e um plano de corte, mesmo para um modo de falha errado, foi mais próximo do obtido no ensaio experimental.

KIM, YOO e ROEDER [30] realizaram um estudo experimental de ligações aparafusadas com placas finas de aço carbono ($t = 1,5$ mm, $t = 3$ mm e $t = 6$ mm) contendo quatro parafusos ($d = 12$ mm) sujeitos a um plano de corte. A pesquisa teve como objetivo avaliar os mecanismos de fratura e a influência do *curling* na resistência última da ligação, sendo o conjunto de amostras estudado variando a espessura e distância entre o eixo do parafuso e extremidade da placa no sentido de aplicação da força. Quanto ao material, foi utilizado o aço carbono SS400 com tensão de escoamento $f_y = 235$ MPa e tensão última $f_u = 400$ MPa, que é equivalente ao ASTM A36 [30]. Com base nos resultados e conclusões obtidas por meio do estudo experimental, os autores concluíram que as ligações com placas finas ($t = 1,5$ mm e $t = 3$ mm) com a distância entre o eixo do furo e extremidade da placa no sentido de

aplicação da carga, e_1 , maior ou igual a $3d$, o efeito *curling* influencia a resistência última da ligação, fazendo com que carga *versus* deslocamento descenda de forma abrupta após a ocorrência do fenômeno. Para as ligações compostas por placas com $e_1 < 3d$ ou com 6 mm de espessura o fenômeno não ocorreu ou não influenciou a resistência última da ligação. A deformação de compressão medida na região de esmagamento da placa, onde ocorre o *curling*, aumenta conforme ocorre o aumento do deslocamento axial até a ocorrência do fenômeno, inclusive nas ligações onde o *curling* não influenciou a carga última da ligação, uma vez que esse ocorreu após a carga última. Com todos os dados apresentados o autor enfatizou a necessidade de se considerar a influência do efeito *curling* nas equações de dimensionamento para placas finas de aço carbono com distância e_1 elevada.

ALIBRAHEMY et al. [31] realizaram um estudo paramétrico baseado em elementos finitos de ligações aparafusadas em aço carbono. A geometria utilizada é composta por duas linhas de dois parafusos simétricos, contendo no total 4 parafusos, que estavam sujeitos a um plano de corte. O estudo paramétrico realizado contempla a variação dos parâmetros e_1 , p_1 , e_2 e p_2 . Os resultados encontrados nos modelos numéricos, tais como, carga última e modo de falha, foram comparados pela previsão dos códigos Eurocode 3, parte 1.8 [23] e *American Institute of Steel Construction – 360-10* [32]. Ao final, com base nos resultados encontrados foram propostas algumas equações para determinar a carga última de ligação sujeita ao modo de falha rasgamento em bloco. As placas finas estudadas foram em aço carbono S275 com as dimensões de 100x100 mm de largura e espessuras de 3 mm, 4 mm, e 5 mm, com 4 furos de 14 mm conectadas por parafusos M12 (classe 8.8) em uma placa rígida de aço carbono S450. Os modelos foram realizados no programa de elementos finitos Abaqus 6.14, onde foi utilizado elementos sólidos com integração reduzida C3D8R. Para definir as propriedades do material foi utilizado a curva de tensão *versus* deformação verdadeira proveniente de uma conversão dos resultados nominais obtidos em um ensaio de caracterização.

Como os modelos numéricos apresentaram uma correlação em termos de carga muito próximo ao experimental, foi realizado um estudo paramétrico contendo 225 ligações. E com os resultados dessas análises numéricas foi possível propor as Equações (15), (16) e (17) que representam os modos de falhas rasgamento em bloco, rasgamento por cisalhamento e ruptura na seção líquida.

Para determinação da carga para o modo de falha rasgamento em bloco (*block tearing*) é utilizado a Equação (15).

$$F_{BT} = A_{nv} \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3}} + A_n \cdot f_u \quad (15)$$

onde, A_{nv} é a área sujeito ao cisalhamento e A_n a área à d tração definida pelos autores, conforme a Figura 13.

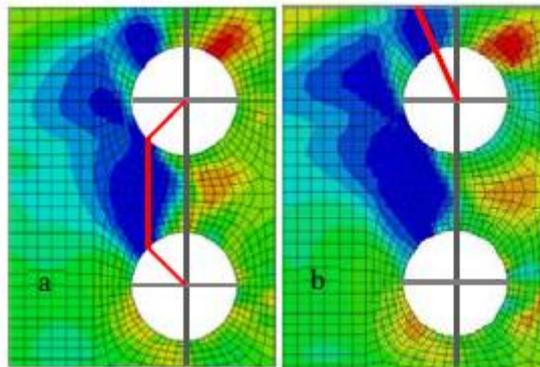


Figura 13 – Região de cisalhamento e tração [31]

Para o modo de falha ruptura por corte na placa ALIBRAHEMY et al. [31] propuseram a Equação (16).

$$F_S = A_{nv} \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3}} \quad (16)$$

E para o modo de falha correspondendo a ruptura na seção líquida é utilizado a Equação (17).

$$F_N = A_v \cdot f_u \quad (17)$$

onde, A_v é área líquida da seção transversal.

Um resumo dos resultados encontrados em cada modelo, 3 mm, 4 mm e 5 mm, é apresentado na Tabela 8, contendo a menor, maior e média das razões, como também o coeficiente de variação (COV), que representa a variabilidade das amostras excluindo a influência da ordem de grandeza de cada modelo.

Tabela 8 – Comparação entre os resultados [31]

t	3 mm			4 mm			5 mm		
	EC3/ FEA	AISC/ FEA	Prop _b / FEA	EC3/ FEA	AISC/ FEA	Prop _b / FEA	EC3/ FEA	AISC/ FEA	Prop _b / FEA
Mínimo	32,0%	30,1%	72,4%	32,3%	30,1%	72,7%	32,9%	30,3%	73,1%
Máximo	96,5%	90,2%	106,7%	94,9%	90,5%	105,2%	96,0%	98,3%	110,8%
Média	68,2%	72,1%	92,2%	68,1%	72,0%	92,0%	68,6%	72,6%	92,8%
COV	20,5%	23,9%	7,9%	20,1%	23,7%	7,4%	19,7%	23,6%	7,3%

Com base nos resultados apresentados, ALIBRAHEMY et al. [31] concluíram que o aumento da distância e_1 e o espaçamento p_1 leva a um aumento da resistência da ligação, e as vezes, a um comportamento distinto. Os autores perceberam que essa diferença ocorre até um valor máximo de $2,5d_0$, podendo chegar até o valor de $3d_0$, onde a alteração é muito pequena e o modo de falha da ligação passa a ser a ruptura na seção líquida para todos os modelos realizados. O aumento de e_2 e p_2 pode levar a um aumento da resistência última da ligação de até 75%, respeitando os limites mínimos dados pelos dois códigos. Para os casos em que $e_1 = 10t$ o aumento da resistência não é significativo devido a presença do efeito *curling*, e para os casos em que $e_1 = d_0$ esse fenômeno alterou o modo de falha previsto. Em ligações com dois grupos de parafuso há uma interação entre os modos de falha, tornando esse tipo de modelo um pouco complexo e justificando a ocorrência de alguns resultados obtidos pelas equações propostas ter sido contra a segurança. Devido a utilização da tensão de escoamento em vez da tensão última para determinação da capacidade da seção na área bruta e rasgamento em bloco, e diminuição da área líquida em ambos os códigos, as equações fornecem valores muito baixos.

Por meio de um estudo experimental com 28 modelos, 7 com um furo e 7 com dois furos no sentido de aplicação da carga, ambos para cada tipo de aço estudado, austenítico e ferrítico, BATISTA [9] concluiu que o efeito *curling* influenciou o comportamento das ligações para os modelos com um furo, em especial para as do tipo austenítico, uma vez que houve uma mudança da tangente no gráfico carga *versus* deslocamento. Nos modelos numéricos, dos mesmos ensaios experimentais, realizado pelo autor, foi encontrado um coeficiente de variação (COV) de 16,3% para as ligações de um furo com aço austenítico e 7,1% para os ferrítico. Já para os modelos com dois furos a diferença foi de 6,3% e 3,1% para o austenítico e ferrítico, respectivamente. Com base no que foi exposto, é possível concluir que os modelos numéricos realizados por BATISTA [9], com exceção do modelo com um furo de aço

austenítico, representaram de forma significativa o comportamento das ligações. Tal divergência deve-se ao fato de que algumas amostras ocorreram uma diferença de 18,1%, -19,5%, e -34,5% que correspondem as amostras realizadas pelo autor com a distância e_1 e e_2 superiores. Os valores com percentual negativos diz respeito a uma diferença em termo de carga última contra a segurança quando comparado com os obtidos nos ensaios experimentais. Após análises dos resultados apresentados, o autor realizou um estudo paramétrico acrescentando 38 modelos que tiveram como parâmetro a variação da largura da placa e a distância entre o eixo do furo e extremidade no sentido de aplicação da carga, onde foi possível concluir que para ligações com e_1/d_0 inferior a 2,5 predomina o modo de falha rasgamento da placa e para valores superiores ocorre o modo de falha esmagamento da placa [9].

Outro estudo paramétrico, realizado por HENRIQUES et al. [33] foi composto pela variação da espessura no intervalo de 2,0 mm a 4,5 mm das ligações apresentadas no estudo anterior. Onde os autores concluíram que a mudança da espessura para as ligações do tipo ferrítico, no intervalo apresentado, não influenciaram o seu comportamento, sendo obtido o mesmo modo de falha com acréscimo da resistência linear. Já para as ligações do tipo austenítico ocorreram algumas variações no modo de falha, que está associado aos diferentes mecanismos desse tipo de aço. Comparando os resultados obtidos no estudo paramétrico com o Eurocode 3, parte 1.4 [21], os autores perceberam que a utilização do f_u no lugar do $f_{u,red}$ na equação de dimensionamento para o modo de falha esmagamento apresentou resultados menos conservadores, porém, ainda abaixo dos valores obtidos numericamente, sendo assim necessário investigar os parâmetros geométricos envolvidos na equação, tais como, e_1 e p_1 . Os autores também apontam que deve ser investigado as condições que limitam a geometria das ligações.

2 DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES APARAFUSADAS

Neste capítulo é abordado os critérios de dimensionamento presentes nas normas vigentes, no que diz respeito, a ligações aparafusadas em aço inoxidável. Sendo apresentado as prescrições do Eurocode 3, parte 1.4 [21], Norma Australiana/Nova Zelândia 4673 [26] e a Norma *American Society of Civil Engineers Specification* – ASCE 8-02 [25]. Adicionalmente, é acrescentado a 4ª edição do manual de projeto para estrutura de aço inoxidável publicado recentemente [34]. Abaixo, é apresentado os limites inferiores para validação da geometria de ligações aparafusadas dado por cada norma, código e manual analisado. E na sequência suas respectivas equações analíticas.

Tabela 9 – Limites inferiores para validação de geometria

Especificação	distância final (e₁)	distância de bordo (e₂)	espaçamento longitudinal (p₁)	espaçamento transversal (p₂)
EC3-1.8/SCI	1,2 d ₀	1,2 d ₀	2,2 d ₀	2,4 d ₀
EC3-1.3	1,0 d ₀	1,5 d ₀	3,0 d ₀	3,0 d ₀
ASCE/AS/NZS	1,5 d ₀	1,5 d ₀	3,0 d ₀	3,0 d ₀

2.1 Eurocode

O Eurocode 3, parte 1.4 [21] trata de regras suplementares sobre aço inoxidável. Para projetos de ligações aparafusadas o código diz que as provisões dadas pelo Eurocode 3, parte 1.8 [23] também são aplicadas ao aço inoxidável. Relativo a ligações aparafusadas, é necessário fazer basicamente duas modificações, uma relacionada ao modo de falha esmagamento da placa e outra ao cisalhamento do parafuso, que são apresentadas no item 6.2 do Eurocode 3, parte 1.4 [21]. Nessa seção, também será abordado as considerações do Eurocode 3, parte 1.3 [22], que trata de regras suplementares sobre membros de aço formados a frio com placa finas, em que se tratando de ligações, o código é válido para o intervalo de espessura, $0,45 \text{ mm} \leq t \leq 4 \text{ mm}$ [22].

Para determinar a resistência de projeto devido ao esmagamento da placa, faz-se necessário a substituição do f_u das equações dada pelo Eurocode 3, parte 1.8 [23], que serão apresentadas mais adiante, pelo $f_{u,red}$ dado pela Equação (18).

$$f_{u,red} = 0.5 \cdot f_y + 0.6 \cdot f_u \leq f_u \quad (18)$$

onde, f_y é a tensão de escoamento do material e f_u a sua tensão última correspondente.

O Eurocode 3, parte 1.8 [23] possui duas equações para o esmagamento da placa: uma para ligações simples com apenas uma única linha de parafuso sob um plano de corte, e outra para os demais tipos de ligações. Para ligações simples, a resistência ao esmagamento, $F_{b,Rd}$, é determinada pela Equação (19).

$$F_{b,Rd} = \frac{1,5 \cdot f_{u,red} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} \quad (19)$$

Para as ligações com dois planos de cortes é utilizado a Equação (20) apresentada abaixo:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_{u,red} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} \quad (20)$$

onde, α_b é o menor valor entre $\left[\alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right]$, sendo na direção de aplicação da carga $\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0}$ para parafuso de extremidade, e $\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}$ para parafusos intermediários. Já na direção perpendicular ao carregamento, para parafusos de extremidade, k_1 é o menor valor entre $\left[2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right]$, e para parafusos intermediários o menor valor entre $\left[1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right]$, e d_0 é o diâmetro do furo da placa de ligação.

Além do modo de falha apresentado acima, o Eurocode 3, parte 1.4 [21], preconiza a verificação de uma possível ruptura na área líquida ou na seção bruta do elemento submetido a esforço de tração. Para determinar a resistência de projeto devido a ruptura da área líquida, é necessário, primeiramente, determinar a menor área líquida da seção transversal devido ao(s) furo(s) existente(s) de toda(s) possível(eis) linha de ruptura. Para isso, é utilizado a Equação (21).

$$A_{net} = t \left(n \cdot d_0 - \sum \frac{s^2}{4p} \right) \quad (21)$$

onde, s é o espaçamento entre eixos de parafusos na direção paralela ao carregamento axial; p o espaçamento entre eixo de parafusos na direção perpendicular ao carregamento; d_0 o diâmetro do furo; n o número de furo na linha de ruptura considerada; e t a espessura da placa.

A Figura 14 ilustra duas possíveis linhas de ruptura (“1” e “2”) e a orientação das variáveis s e p utilizadas na Equação (21).

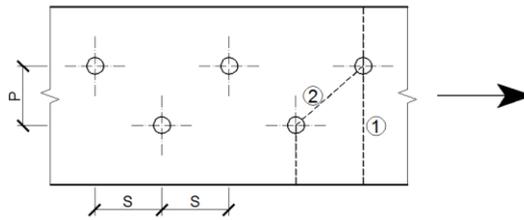


Figura 14 – Exemplo de linha de ruptura na seção líquida

A resistência da ligação sob esforço de tração, considerando área líquida, A_{net} , é calculada pela Equação (22).

$$N_{u,Rd} = \frac{k_r \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (22)$$

onde, k_r é calculado pela equação (23).

$$k_r = (1 + 3r(d_0/u - 0,3)) \leq 1 \quad (23)$$

em que r é o número de parafusos na seção transversal dividido pelo número total de parafusos que compõe a ligação, e $u = 2e_2 \leq p_2$.

Já para determinar a resistência plástica na seção bruta é utilizado a Equação (24).

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (24)$$

onde, γ_{M0} é fator referente a seção transversal que é igual 1,0.

A resistência a tração, $N_{t,Rd}$, é dada pelo menor valor encontrado pelas Equações (22) e (24). O modo de ruptura da ligação previsto pelo código será o menor valor encontrado pelas Equações, (19) ou (20), e (22) ou (24).

É importante destacar que o Eurocode 3, parte 1.4 [21] não diz nada a respeito do efeito *curling*, não o considerando assim, como um modo de falha.

Do Eurocode 3, parte 1.3 [22] será abordado nessa dissertação o esmagamento, principal modo das ligações estudadas, para fins de comparação dos resultados encontrado no presente projeto, sendo esse calculado pela Equação (25).

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot \alpha_b \cdot k_t \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} \quad (25)$$

Comparando as equações do modo de falha esmagamento das normas apresentadas, o Eurocode 3, parte 1.4 [21] utiliza a equação dada pelo Eurocode 3, parte 1.8 [23], onde é substituído o valor de f_u pelo $f_{u,red}$. Já para o Eurocode 3, parte 1.3 [22], é utilizado o valor de f_u . Nessa última, não há uma equação específica para ligações simples, como há para o código anterior, as tornando assim diferentes. Já para ligações com dois planos de cortes, quando o valor de k_1 dado pelo Eurocode 3, parte 1.8 [23] é igual a 2,5, as equações se tornam bem semelhantes, diferenciando apenas quanto a tensão última do material.

Para parafusos em aço carbono (material utilizado para realização dos ensaios experimentais dessa dissertação), o Eurocode 3, parte 1.8 [23] preconiza a Equação (26) para determinação da carga por plano de cisalhamento do parafuso.

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} \quad (26)$$

onde, A é igual a área de tração, A_s , do parafuso caso o plano de corte passe pela rosca e α_v é igual a 0,6 para parafusos classes 4.6, 5.6 e 8.8 ou igual a 0,5 para parafusos classes 4.8, 5.8, 6.8 e 10.9; ou A é igual a área bruta da seção transversal do parafuso caso o plano de corte passe fora da região rosqueada e α_v é igual 0,6. No próximo item são apresentadas as equações preconizadas pelas normas *American*

Society of Civil Engineers Specification – ASCE 8-02 [25] e Australiana/Nova Zelândia 4673 [26].

2.2 Norma Australiana/Nova Zelândia e Norma Americana

As recomendações dadas pela *American Society of Civil Engineers Specification* – ASCE 8-02 [25] para ligações aparafusadas, em seu item 1.4.2, são idênticas as prescrições da norma Australiana/Nova Zelândia 4673 [26]. Sendo assim, serão apresentados as equações para cada modo de falha com a nomenclatura utilizada nessa última.

A norma Australiana/Nova Zelândia 4673 [26] trata de estruturas de aço inoxidável conformado a frio, sendo a seção 5 a respeito de ligações, e mais especificadamente no item 5.3 sobre o tipo aparafusadas. De acordo com a norma, devem ser utilizados furos padronizados como apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Diâmetro de furos considerado pelas normas AS/NZS [26]

diâmetro nominal do parafuso (d_f) [mm]	diâmetro do furo padronizado (d_h) [mm]	diâmetro de furo com grandes dimensões (d_h) [mm]	dimensão do furo oblongo curto [mm]	dimensão do furo oblongo longo [mm]
< 12	$d_f + 1$	$d_f + 2$	$(d_f + 1)$ por $(d_f + 6)$	$(d_f + 1)$ por $(2,5d_f)$
≥ 12	$d_f + 2$	$d_f + 3$	$(d_f + 2)$ por $(d_f + 6)$	$(d_f + 2)$ por $(2,5d_f)$

Para a configuração da geometria da ligação, a distância mínima entre eixo de furos padrões é de $3d_f$ e a distância mínima entre o eixo do furo padrão e a extremidade da placa ou contorno de outro membro é de $1,5d_f$. Para os demais tipos de furação a distância mínima entre bordas de furos, borda do furo e extremidade da placa ou contorno de outro membro deve ser inferior a $[e - (d_h/2)]$, onde “e” é igual a distância medida na direção de aplicação de carga do eixo de um furo padrão até a borda mais próxima, sendo essa um furo adjacente ou o final da parte conectada. Em todos os casos, a distância livre entre bordas de furos e entre borda de furo e extremidade da placa não devem ser inferiores a $2d_f$ e d_f , respectivamente.

O modo de falha da ligação representa a componente mais frágil determinada pelas equações de cada modo de falha. A norma Australiana/Nova Zelândia 4673 [26],

diferentemente do Eurocode 3, parte 1.8 [23], possui uma equação separada para o modo de falha rasgamento da placa entre furos ou entre furo e borda (*Tear out*), onde a carga de ruptura para esse modo é dada pela Equação (27).

$$V_f = \phi \cdot t \cdot e \cdot f_{ut} \quad (27)$$

em que, ϕ é o coeficiente de segurança e igual a 0,7 para esse modo de falha; t a espessura da placa; f_{ut} é a resistência última do material na direção transversal de aplicação da carga.

O esmagamento da placa possui duas equações, assim como, é preconizado pelo Eurocode 3, parte 1.8 [23], sendo a resistência de projeto determinada pela Equação (28).

$$V_b^* = \phi \cdot V_b \quad (28)$$

onde, ϕ é o coeficiente de segurança e igual a 0,65 para esse modo de falha, e V_b a capacidade nominal ao esmagamento determinada pela Equações (29) ou (30).

Quando a ligação for do tipo simples, parafuso sob um plano de corte, o valor de V_b é determinado pelo Equação (29).

$$V_b = 2 \cdot d_f \cdot t \cdot f_u \quad (29)$$

onde, f_u é a resistência última do material no sentido de aplicação da carga.

Para o modo de falha apresentado, as variáveis da equação (29) são as mesmas apresentadas para o mesmo modo de falha do Eurocode 3, parte 1.8 [23], porém o valor da constante (2,0) é superior ao definido pelo código europeu (1,5). Entretanto, para determinar a carga de projeto, o coeficiente de redução desse é inferior àquele.

Já para as ligações com o parafuso sob dois planos de corte é utilizado a Equação (30).

$$V_b = 2,75 \cdot d_f \cdot t \cdot f_u \quad (30)$$

As equações das normas americana e Australiana/Nova Zelândia 4673 [26] utilizam as propriedades efetivas do aço inoxidável, como visto no modo de falha

corresponde ao esmagamento da placa, por exemplo, é utilizado o valor da tensão última do material no sentido de aplicação da força. Já o Eurocode 3, parte 1.4 [21] utiliza um valor de tensão última reduzida, como visto anteriormente na Equação (18). Outro ponto importante observado, foi que o código europeu de aço inoxidável não considera a propriedade do material no sentido de aplicação da força, não levando em conta a anisotropia do aço inoxidável.

Para a determinação da carga de projeto correspondente a ruptura na área líquida é utilizada a Equação (31).

$$N_f = \phi \cdot A_n \cdot f_t \leq 0,85 \cdot A_n \cdot f_y \quad (31)$$

onde, ϕ é o coeficiente de segurança e igual a 0,7 para esse modo de falha; f_t é a resistência a tração da ligação com arruela em ambos os lados, que é determinado pelas Equações (32) ou (33), diferentemente do Eurocode 3, parte 1.1 [35].

Em ligações com o parafuso sujeito a um plano de corte é utilizado a Equação (32).

$$f_t = \left(1 - r_f + \left(\frac{2,5 \cdot r_f \cdot d_f}{s_f} \right) \right) \cdot f_u \leq f_u \quad (32)$$

Já para ligações com o parafuso sujeito a dois planos de cortes é utilizado a equação (33).

$$f_t = \left(1 - 0,9 \cdot r_f + \left(\frac{3 \cdot r_f \cdot d_f}{s_f} \right) \right) \cdot f_u \leq f_u \quad (33)$$

onde, r_f é a relação da força transmitida pelo(os) parafuso(os) considerado na seção sobre a força no membro. Se essa relação for inferior a 0,2, o valor da constante pode ser tomado como zero. E s_f é o espaçamento perpendicular entre furos ou a largura da placa para ligações com um parafuso.

Para determinação dos modos de falha em parafusos de aço inoxidáveis, a norma Australiana/Nova Zelândia 4673 [26] apresenta equações para parafusos ASTM e ISO. Tais equações não serão apresentadas nessa dissertação, já que foram utilizados parafusos de aço carbono no estudo experimental, sendo apresentado as

equações fornecidas pela norma Australiana/Nova Zelândia 4600 [36] para parafusos de aço carbono.

Na determinação da carga de projeto correspondente ao corte no parafuso é utilizado a Equação (34).

$$V_{fv}^* \leq \phi \cdot V_{fv} \quad (34)$$

onde, V_{fv} é a resistência nominal devido ao cisalhamento no parafuso, calculado pela Equação (35); e ϕ o fator de redução para parafuso(s) sujeito(os) ao cisalhamento e igual a 0,8.

$$V_{fv} = 0,62 \cdot f_{ut} \cdot (n_n A_c + n_x \cdot A_0) \quad (35)$$

sendo, f_{ut} a mínima tensão de tração do parafuso e igual a 480 MPa para classe 4.6 ou 830 MPa para classe 8.8; n_n é o número de plano(s) de corte(s) sob a rosca do parafuso; A_c o menor diâmetro do parafuso; n_x o número de plano(s) de corte(es) fora da rosca; e A_0 a área bruta do parafuso.

A norma Australiana/Nova Zelândia 4673 [26] preconiza a verificação da resistência da placa ao modo de falha tipo *pull-over* (*pull-through*) quando for considerado a tração no parafuso. No próximo item, é apresentado as formulações dadas pelo manual da SCI *Steel Knowledge* [34].

2.3 Manual de projeto para estrutura de aço inoxidável

O recente manual de estrutura de aço inoxidável, desenvolvido pela SCI *Steel Knowledge* [34], trata-se de novas regras para implementação do Eurocode 3, parte 1.4 [21]. O código está em processo de revisão que deverá ser publicado em 2023.

Tratando-se de ligações aparafusadas, é apresentado a Equação (36) para determinação da resistência ao esmagamento, $F_{b,Rd}$, (*bearing resistance*).

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot \alpha_b \cdot k_t \cdot t \cdot d \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (36)$$

onde, α_b é o coeficiente de esmagamento na direção de aplicação da carga; k_t é o coeficiente de esmagamento na direção perpendicular a carga; d o diâmetro do parafuso; t a espessura da placa e f_u a sua resistência última; e γ_{M2} o coeficiente de segurança igual a 1,25.

O manual divide as ligações aparafusadas em dois grupos, que são baseadas em sua espessura, placas finas para $t \leq 3$ mm e placas espessas para $t > 3$ mm. Para as ligações com placas finas com dois planos de cortes com a placa central controlando o dimensionamento, os coeficientes de esmagamento são os mesmos para as placas espessas, sendo calculado pelas Equações (37) e (38):

$$\alpha_b = \min \left\{ 1,0, \frac{e_1}{3d_0} \right\} \quad (37)$$

$$k_t = \begin{cases} 1,0 & \text{para } \left(\frac{e_2}{d_0} \right) > 1,5 \\ 0,8 & \text{para } \left(\frac{e_2}{d_0} \right) \leq 1,5 \end{cases} \quad (38)$$

Já para as demais ligações de placas finas, é dado os seguintes coeficiente de esmagamento: $k_t = 0,64$ e α_b é calculado pela Equação (39).

$$\alpha_b = \min \left\{ 1,0, \frac{e_1}{2d_0} \right\} \quad (39)$$

Já para placa espessas, os coeficientes α_b e k_t são determinados pelas Equações (37) e (38) respectivamente. Tratando-se de ligações com controle de deformação (estado limite de serviço), tanto para placas finas quanto para placas espessas, o coeficiente α_b é calculado pela Equação (39) e $k_t = 0,5$.

Para o dimensionamento de membros sujeito à tração, o manual apresenta uma alteração na equação utilizada pelo Eurocode 3, parte 1.4 [21] para a ruptura na seção líquida. Onde é proposto a Equação (40).

$$N_{u,Rd} = \frac{k \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (40)$$

Como apresentado, houve a substituição da variável k_r pela variável k , que é dada de acordo com o modo de fabricação do furo e carregamento. Sendo o seu valor

igual a: $k = 1,0$ para furações regulares (sem entalhes, fabricados por furação ou corte com jato de água); $k = 0,9$ para furações irregulares ou estruturas sujeito à fadiga. Para o dimensionamento da área bruta nada foi alterado.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental exposto neste capítulo foi desenvolvido no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), composto por ensaios de ligações aparafusadas de aço inoxidável do tipo austenítico 304 e ferrítico 430, onde foi possível obter a carga última e modo de falha que caracterizou a ruptura de cada teste.

3.1 Ensaios experimentais das ligações aparafusadas

Para realização dos ensaios experimentais foram confeccionadas placas com e sem enrijecedor, como apresentado na Figura 15. Em detalhes, a dimensão descrita por w corresponde a largura da placa com valor nominal de 50 mm e L o seu comprimento sendo igual a 400 mm.

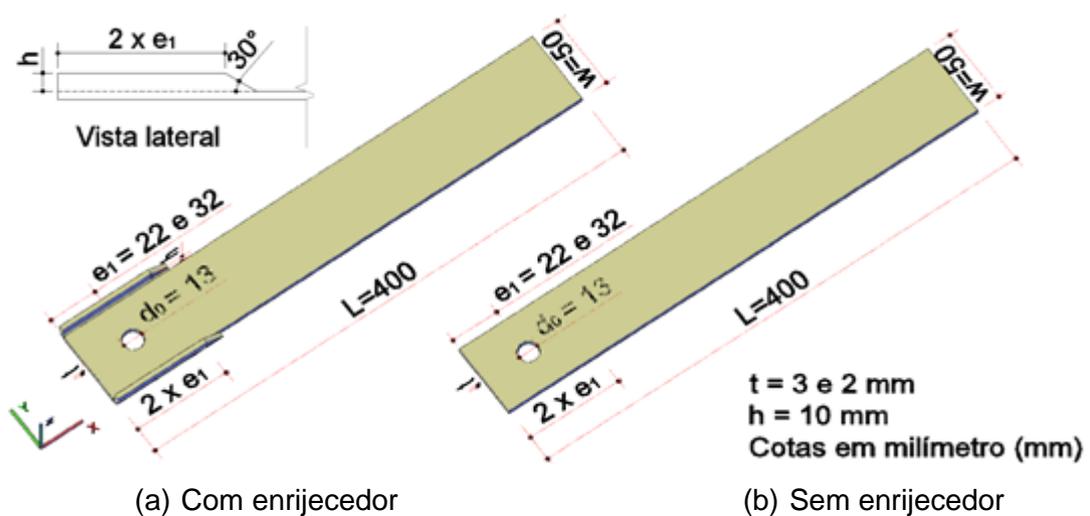


Figura 15 – Tipos de placas ensaiadas

Foram realizados 20 ensaios experimentais, sendo desse montante 18 testes com placas de espessura com valor nominal de 3 mm e 2 testes adicionais com espessura de 2 mm. O número de ensaios foi definido considerando a existência de ensaios já realizados por BATISTA [9] e FREIRE [11], sendo então realizados testes buscando analisar uma maior quantidade de variáveis que a repetição dos ensaios.

A distância entre o eixo do furo e a extremidade da placa no sentido axial, e_1 , foram de 22 mm e de 32 mm, valores correspondentes a pesquisa realizada por BATISTA [9]. O diâmetro nominal do furo de todas as placas foi de 13 mm, sendo, aproximadamente, 1 mm superior ao diâmetro dos parafusos utilizados. O comprimento da parte enrijecida, para os modelos conforme a Figura 15(a), seguiram o valor correspondente a 2 vezes o valor de e_1 , nomeado como L_2 . Este valor foi proposto por YANCHENG e YOUNG [24]. A altura utilizada no enrijecedor, h , foi de aproximadamente 14 mm, que atende aos limites dados pelo Eurocode 3, parte 1.3 [22] para garantir a efetividade do reforço.

A realização de ensaios com placas de aço inoxidável enrijecida teve como objetivo avaliar a capacidade do mesmo em minimizar a influência do efeito *curling* na resistência última da ligação. Um estudo realizado por SOBRINHO et al. [16] demonstrou que o efeito *curling* pode influenciar a resistência última de ligações aparafusadas, de forma aproximada, em até 12%, e esse fenômeno, não é considerado pelas normas e códigos vigentes, como foi apresentado no Capítulo 2 dessa dissertação.

Uma tabela contendo as propriedades geométricas de todos os testes, medidas com a utilização de um paquímetro de precisão de 0,2 mm, são apresentadas na Tabela 11 e Tabela 12 para os modelos de aço inoxidáveis austenítico e ferrítico, respectivamente. Para a identificação de cada ensaio foi utilizado um código composto por 4 incógnitas. Na primeira parcela é atribuído os valores D2E, D2S, D3S, S1S ou S2S. O primeiro caractere representa o número de planos de cortes no parafuso, sendo “D” para dois planos ou “S” para uma ligação simples. O numeral que representa o segundo caractere significa o número de placas de aço inoxidáveis que compõe a ligação. O terceiro e último caractere da primeira fração do código representa a inclusão do enrijecedor, onde, em detalhes, “E” ou “S” corresponde a placas com e sem enrijecedor, respectivamente. Para uma melhor compreensão, a Figura 16 apresenta os desenhos esquemáticos de cada tipo de ligação abordado. As placas com tom “avermelhado” correspondem a placas de aço carbono ($t = 16$ mm)

com rigidez e resistência suficientes para que a análise das placas de aço inoxidáveis controlem o dimensionamento.

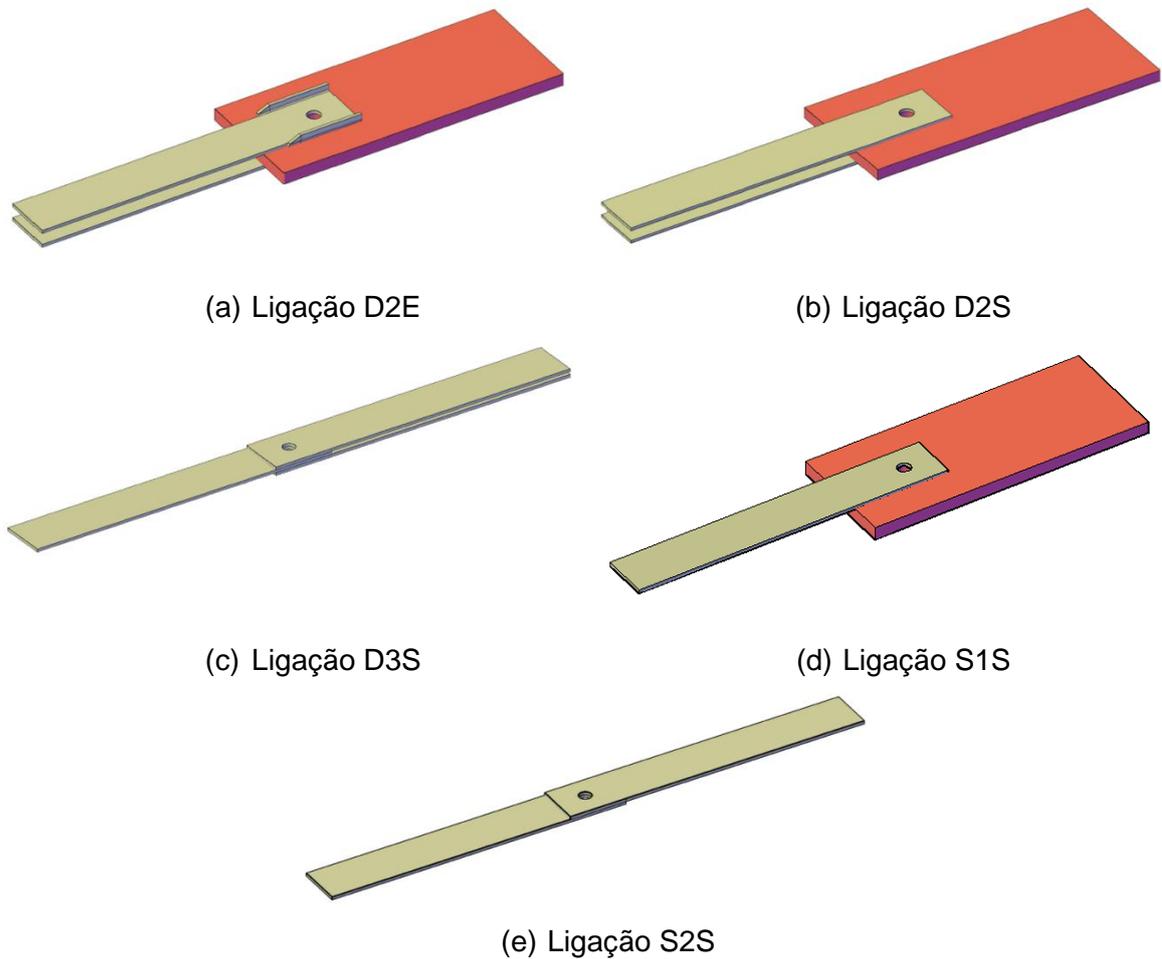


Figura 16 – Tipos de ligações estudadas

A segunda fração do código representa o valor de e_1 . Em seguida, a terceira corresponde a largura da placa. E por fim, a última fração, que é composta por dois caracteres, sendo o primeiro atribuído o valor de “A” para aço austenítico ou “F” para aço ferrítico, e ainda, o valor numérico correspondendo a espessura nominal da placa. A Figura 17 apresenta os possíveis valores de cada parâmetro.

Os valores e_{2i} e e_{2s} representam a distância, em milímetro, entre o eixo do furo e as bordas superior e inferior, respectivamente. Os valores destacados correspondem a medidas reais aferidas após a confecção de cada placa.

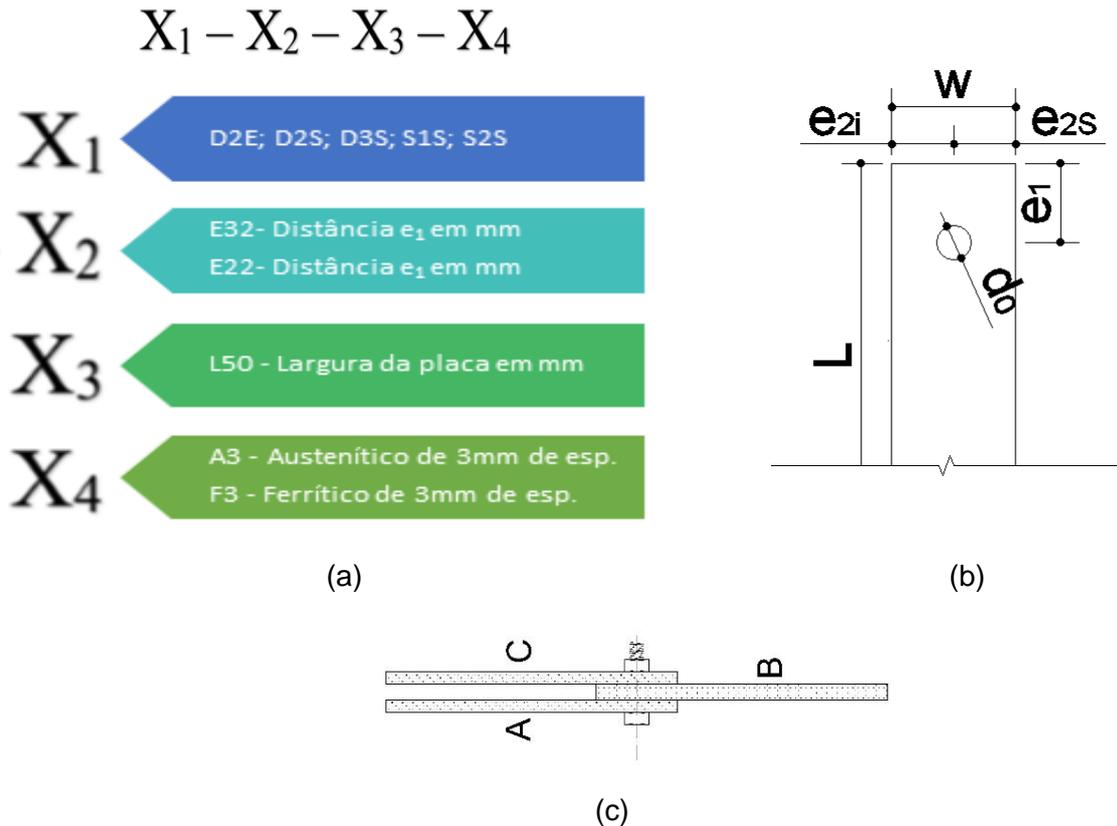


Figura 17 – Nomenclatura utilizada para os testes

Os valores de lado “A”, “B” e “C” representam uma identificação que é de acordo com o número de placas que compõe a mesma ligação (ver Figura 17(c)) e “t” sua espessura. As demais variáveis já foram citadas ao longo desta dissertação.

O programa experimental teve como objetivo avaliar a diferença entre o comportamento de dois tipos de aço inoxidáveis e analisar a ruptura de ligações aparafusadas em cinco padrões de configurações. Os modelos do tipo D2E e D2S foram escolhidos, dessa forma, para estudar a influência do enrijecedor em minimizar os fenômenos causados pelo efeito *curling*. Logo, também, foram adotadas ligações do tipo D3S, em que a placa central controla o dimensionamento e está impedida de ocorrer o efeito *curling* pelas placas de extremidades.

Testes com a configuração de dois planos de cortes foram adicionados para analisar o seu comportamento com a presença do efeito *curling*, onde as ligações do tipo S2S estão sujeitas a ocorrência de mais um fenômeno, o efeito *pulling into line*.

Tabela 11 – Modelos de aço inoxidáveis do tipo austenítico

Teste	Código	Lado	t [mm]	e ₁ [mm]	w [mm]	e _{2s} [mm]	e _{2i} [mm]	d ₀ [mm]
1	D2E-E32-L50-A3	A	3,10	32,00	50,08	25,26	24,82	13,00
	D2E-E32-L50-A3	C	3,10	31,93	50,36	25,41	24,95	13,02
2	D2S-E22-L50-A2	A	2,06	22,03	50,30	25,25	25,05	13,02
	D2S-E22-L50-A2	C	2,06	21,90	50,30	25,24	25,06	13,00
3	D2S-E22-L50-A3	A	3,10	22,07	50,24	25,11	25,13	13,02
	D2S-E22-L50-A3	C	3,08	21,98	50,30	24,58	25,72	13,00
4	D2S-E32-L50-A2	A	2,04	31,98	49,94	24,92	25,02	13,00
	D2S-E32-L50-A2	C	2,04	32,03	50,32	24,71	25,61	13,02
5	D2S-E32-L50-A3	A	3,10	31,98	50,10	25,50	24,60	13,00
	D2S-E32-L50-A3	C	3,10	31,80	50,30	24,80	25,50	13,00
6	D3S-E22-L50-A3	B	3,08	22,04	50,30	23,30	27,00	13,00
7	D3S-E32-L50-A3	B	3,08	32,30	50,26	25,12	25,14	13,00
8	S1S-E22-L50-A3	A	3,10	21,97	50,42	24,81	25,61	13,02
9	S1S-E32-L50-A3	A	3,08	31,75	50,22	23,81	26,41	13,02
10	S2S-E22-L50-A3	A	3,06	21,96	50,14	23,76	26,38	13,00
	S2S-E22-L50-A3	B	3,10	22,00	50,28	25,38	24,90	13,00
11	S2S-E32-L50-A3	A	3,10	32,04	50,30	24,42	25,88	13,00
	S2S-E32-L50-A3	B	3,10	32,10	50,20	24,90	25,30	13,00

Tabela 12 – Modelos de aço inoxidáveis do tipo ferrítico

Teste	Código	Lado	t [mm]	e ₁ [mm]	w [mm]	e _{2s} [mm]	e _{2i} [mm]	d ₀ [mm]
12	D2E-E32-L50-F3	A	3,04	32,00	50,84	25,58	25,26	13,00
	D2E-E32-L50-F3	C	3,02	31,51	50,36	25,67	24,69	13,02
13	D2S-E22-L50-F3	A	3,08	21,71	50,30	24,97	25,33	13,02
	D2S-E22-L50-F3	C	3,06	22,20	50,16	24,96	25,20	13,00
14	D2S-E32-L50-F3	A	3,04	31,80	50,14	25,32	24,82	13,00
	D2S-E32-L50-F3	C	3,10	32,24	50,18	24,82	25,36	13,00
15	D3S-E22-L50-F3	B	3,04	21,83	50,30	25,17	25,13	13,02
16	D3S-E32-L50-F3	B	3,06	31,79	50,00	24,87	25,13	13,02
17	S1S-E22-L50-F3	A	3,04	22,22	50,16	24,90	25,26	13,00
18	S1S-E32-L50-F3	A	3,12	31,85	50,32	24,81	25,51	13,02
19	S2S-E22-L50-F3	A	3,08	22,79	50,12	25,01	25,11	13,02
	S2S-E22-L50-F3	B	3,04	22,34	50,10	25,20	24,90	13,00
20	S2S-E32-L50-F3	A	3,08	31,67	50,04	24,91	25,13	13,02
	S2S-E32-L50-F3	B	3,10	32,59	50,22	24,73	25,49	13,02

Na próxima seção serão apresentados os modos em que foram preparados os testes de cada ensaio, onde é descrito os equipamentos e procedimentos utilizados.

A nomenclatura dos CP's foi definida por um código composto por 5 caracteres, onde os primeiros dois caracteres podem ser iguais a "C1" ou "C2" (corpo de prova 01 e corpo de prova 02, respectivamente), que representa a repetição do mesmo modelo. O terceiro caractere será representado por uma letra, sendo "A" para os CP's de aço austenítico e "F" para ferrítico. Os dois últimos caracteres definem o valor do ângulo em graus entre o sentido da laminação da placa com o sentido de aplicação do carregamento, sendo "00", "45" ou "90". As espessuras dos copos de provas desse estudo possuíam o valor nominal de 3 mm, e adicionalmente, foi realizado mais dois ensaios de caracterização com a laminação no sentido de aplicação da força (0° graus) para uma placa de aço austenítico 304 de 2 mm. Para esses CP's, foi acrescentado um sufixo "-2".

Em resumo, a Tabela 13 apresenta as principais propriedades geométricas com valores reais obtidos com um paquímetro de todos os CP's ensaiados, sendo o valor de, d_{Garras} , a distância entre as garras, em milímetros. Tal valor, como também os demais, são apresentados nesta tabela onde as premissas do sistema de aquisição de dados utilizado para os ensaios de caracterização são reportadas.

Tabela 13 – Propriedades geométricas dos corpos de provas ensaiados

Código	b [mm]	t [mm]	L [mm]	L₀ [mm]	d_{Garras} [mm]
C1A00	12,50	3,00	200,00	50,00	125,00
C2A00	12,50	3,00	200,00	50,00	120,00
C1A45	12,48	3,04	200,16	49,44	103,48
C2A45	12,44	3,04	200,22	49,56	102,86
C1A90	12,46	3,02	200,20	49,50	103,34
C2A90	12,34	3,02	200,20	49,50	107,66
C1F00	12,46	3,02	200,20	49,58	104,40
C2F00	12,46	3,02	200,16	49,58	100,78
C1F45	12,50	3,00	200,16	49,34	101,76
C2F45	12,48	3,00	200,16	49,64	103,66
C1F90	12,46	3,02	200,28	49,40	106,80
C2F90	12,46	3,02	200,24	49,58	105,30
C1A00-2	12,40	1,94	200,24	49,30	100,00
C2A00-2	12,48	1,94	200,30	49,32	99,62

Os ensaios de caracterização dos materiais seguiram as descrições HUANG & YOUNG [38] e foram realizados na máquina de tração computadorizada Instron 3382

com capacidade de 100kN apresentada na Figura 20. A máquina possui um sistema de aquisição de dados próprio, o *Bluehill 3*, que fornece a curva de tensão *versus* deformação nominal dos ensaios. Com a curva, que demonstra o comportamento do material, é possível determinar as propriedades mecânicas dos tipos de aço inoxidáveis estudados para cada sentido da laminação apresentado.

De modo a obter uma redundância nos resultados de caracterização dos materiais e uma validação dos mesmos, as medições das deformações são realizadas por dois equipamentos, até os 5%: *strain gauge*, localizado na parte superior da garra, e o pelo *crip gauge*, equipamento instalado no próprio corpo de prova.



(a) Máquina Instron



(b) Garras da máquina

Figura 20 – Máquina Instron 3382 de 100 kN

Para cada CP, foi realizado uma repetição com a mesma configuração conforme a Tabela 13. Sendo assim, as propriedades mecânicas foram obtidas pela média aritmética de cada ensaio repetido, e os seus valores, são apresentados na Tabela 14, tais como, módulo de Young (E), tensão a 0,2% de deformação ($\sigma_{0,2\%}$), tensão última (σ_u) e suas respectivas deformações ($\epsilon_{0,2\%}$ e ϵ_u).

Para efeito de comparações, também são apresentados na Tabela 14 os valores $\sigma_{0,2\%}$ e σ_u fornecidos pelo Eurocode 3, parte 1,4 [21], que são válidos para produtos formados a frio com espessura menor ou igual a 6 mm, onde é possível perceber o quão o código é conservador para o aço austenítico, já que foi encontrado uma razão de 1,59.

Tabela 14 – Propriedades médias dos CP's

CP	E [GPa]	$\sigma_{0,2\%}$ [MPa]	$\epsilon_{0,2\%}$ [%]	σ_u [MPa]	ϵ_u [%]	EC3-1.4	
						$\sigma_{0,2\%}$ [MPa]	σ_u [Mpa]
A00	202	275	0,336	860	55,2	230	540
A45	245	276	0,313	873	64,7		
A90	258	279	0,308	879	62,0		
A00-2	190	307	0,362	812	58,0		
F00	271	281	0,260	472	17,2	260	450
F45	254	322	0,286	484	15,6		
F90	219	325	0,291	500	15,0		

Os gráficos correspondentes as curvas tensão *versus* deformação obtidas nos ensaios de caracterização dos aços inoxidáveis austenítico 304 e ferrítico 430 são apresentados na Figura 21 e Figura 22 para três sentidos diferentes da laminação. Devido a pequena quantidade de material, para a placa adicional de aço austenítico com 2 mm de espessura nominal, só foi possível realizar o ensaio de caracterização com a orientação da fibra a 0°.

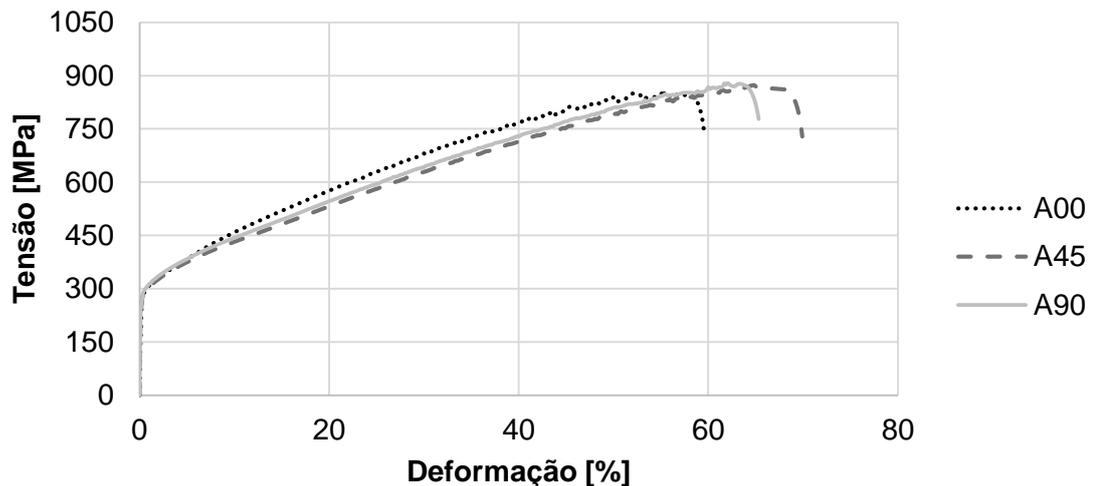


Figura 21 – Caracterização dos CP's austenítico para t = 3 mm

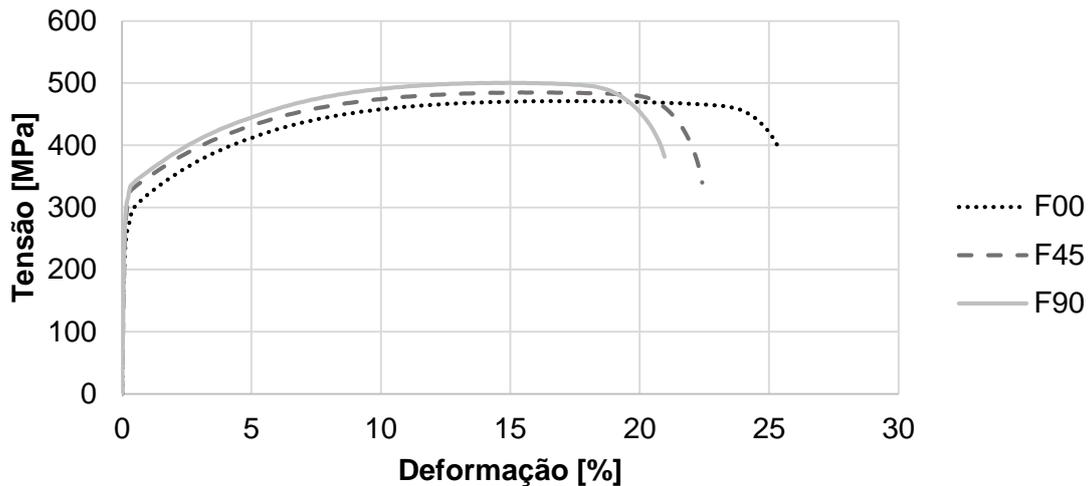


Figura 22 – Caracterização dos CP's ferrítico para $t = 3$ mm

Para a placa adicional ($t = 2$ mm), onde foi utilizado o corpo de prova A00-2, é apresentado a sua curva tensão *versus* deformação na Figura 23, juntamente com o CP proveniente da placa de 3 mm com o mesmo sentido da laminação para fins de comparações.

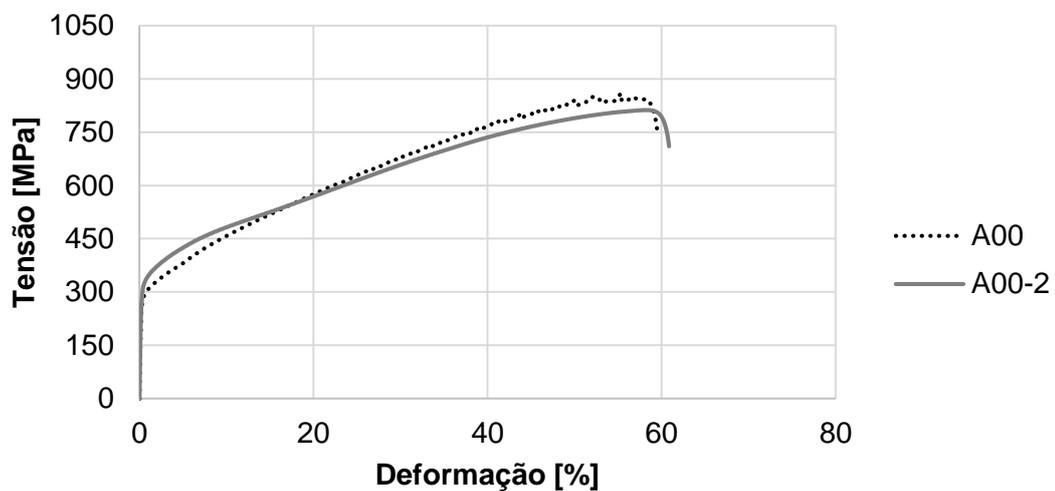


Figura 23 – Comparação da caracterização para diferentes espessuras do aço austenítico

Como apresentado, em ambos os materiais foi possível detectar a propriedade anisotrópica do aço inoxidável, pois diferentes valores de tensões e módulo de Young foram observados, mesmo esta variação não sendo significativa para uma tensões a 0,2% de deformação do aço austenítico. Já para o aço ferrítico, o efeito da anisotropia

para uma mesma tensões a 0,2% de deformação se demonstrou mais evidente. E analisando a tensão última dos materiais, observa-se de forma mais clara a diferença entre os valores de tensão para cada sentido da laminação, que foi superior para um ângulo entre o carregamento e o sentido da laminação do material de 90°, ou seja, para o carregamento no mesmo sentido da laminação, 0°, foi encontrado o menor valor para os dois tipos de aço inoxidáveis. Em um estudo análogo, realizado por SANTOS [39], onde através de 5 ensaios de caracterização com a laminação paralela ao carregamento e três perpendicular, foi encontrado uma tensão última média superior para a laminação perpendicular ao carregamento em uma razão de 1,05. A investigação do material para diferentes ângulos entre a laminação e o carregamento teve como objetivo apresentar uma introdução a respeito da anisotropia do aço inoxidável. E como as normas *American Society of Civil Engineers Specification – ASCE 8-02* [25] e *Australiana/Nova Zelândia* [26] utilizam a propriedade do material no sentido transversal ao carregamento foi necessário a obtenção da respectiva tensão última para determinação da carga correspondente ao modo de falha rasgamento da placa, que serão apresentados no próximo capítulo.

Quanto a rigidez do material (analisando o módulo de elasticidade), diferentes curvas foram encontradas para essa dissertação, onde, para o aço austenítico, o CP-A00 foi o que apresentou a menor rigidez e uma ruptura para uma menor deformação última. Já para o aço ferrítico, o CP-F00 apresentou uma queda de rigidez mais prematura, porém, com maior capacidade de deformação. Tanto para o aço austenítico quanto para o aço ferrítico, os corpos de provas com a laminação a 45° tiveram um comportamento médio entre os ângulos de 0° e 90°. Na Figura 24 é apresentado alguns dos CP's austenítico e ferrítico após a ruptura para comparação.

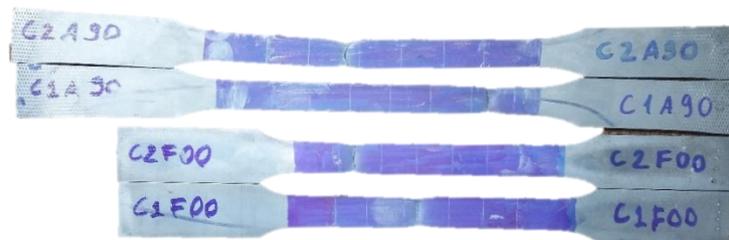


Figura 24 – Exemplo de CP austenítico e ferrítico após ruptura

Como demonstrado na Figura 23, a caracterização da placa de aço inoxidável austenítico com 2 mm apresentou um comportamento distinto quando comparado com a de 3 mm. O CP-A00-2, apesar de ter iniciado com um módulo de Young inferior, na sua região de comportamento plástico do material, a queda da rigidez ocorreu sob tensões maiores, sendo assim, obtido um valor de $\sigma_{0,2\%}$ superior. Uma outra queda de rigidez ocorre aproximadamente em 10% de deformação, porém de forma mais abrupta, até que a estrutura interna do material se reorganize (aproximadamente com $\epsilon = 20\%$) e o mesmo começa a sofrer deformações de forma mais harmônica. Esses materiais foram adquiridos de locais diferentes, sendo assim, tal diferença pode estar relacionada ao processo de fabricação dos mesmos. No próximo item, é apresentado o processo de confecção dos testes para a realização dos ensaios de tração das ligações aparafusadas.

3.3 Confecção das placas

As placas de aço inoxidáveis ASTM/AISI austenítico 304 e ferrítico 430 foram adquiridas da empresa Açotubo Aço Inoxidável. Elas foram cortadas na dimensão de 50 x 400 mm usando uma guilhotina hidráulica GHN 3013 Newton, conforme Figura 25 (a). Já para os testes com placas enrijecidas, o corte foi realizado a laser, pela mesma empresa que confeccionou os corpos de provas para caracterização dos materiais, e após cortados, as dobras foram realizadas em uma prensa dobradeira PDH 10030, também da empresa Newton, demonstrado pela Figura 25 (b).



(a) Corte da placa



(b) Dobra do enrijecedor

Figura 25 – Corte e dobragem das placas de aço inoxidáveis

Após os cortes, foram realizadas furações com a utilização de três brocas com diâmetros diferentes até chegar na dimensão almejada. Para isso, foi utilizado uma furadeira de coluna Yadoya FYA-I do laboratório de Mecânica da UERJ. Uma fotografia do processo é apresentada na Figura 26. Os valores finais do diâmetro dos furos, d_0 , foram apresentados na Tabela 11 e Tabela 12 para as placas de aço inoxidável austenítico e ferrítico, respectivamente.



Figura 26 – Furação das placas de aço inoxidáveis

O tipo de parafuso utilizado na realização dos ensaios é apresentado na Figura 27, parafuso de cabeça cilíndrica com sextavado interno, onde foi utilizado o de aço liga temperado e revenido M12 – classe 12.9 da Belenus. Sua especificação técnica é exibida na Tabela 15 [40].



Figura 27 – Característica do parafuso [41]

Tabela 15– Especificação técnica do parafuso [40]

Classe de resistência	Dureza	Resistência à tração mínima [kgf/mm ²]	Tensão escoamento mínima [kgf/mm ²]	Alongamento mínimo [%]	Estricção mínima [%]	
5,8	-	82 - 95 HRB	53,0	42,0	15	50
8,8	< M16	22 - 32 HRB	81,5	65,3	12	52
8,8	> M16	23 - 34 HRB	84,6	66,0	11	52
10,9	-	32 - 39 HRB	106,2	95,5	9	48
12,9	-	39 -44 HRB	124,9	112,2	8	44

Na próxima seção é apresentada a instrumentação utilizada para realização dos testes.

3.4 Instrumentação e sistema de aquisição de dados

Com o objetivo de medir a deformação em um ponto específico, foi utilizado um extensômetro à distância de 12 mm da extremidade das placas de aço inoxidáveis com e_1 de 32 mm, conforme desenho esquemático da Figura 28 e fotografia da Figura 29, as placas com grid em vermelho são de aço austenítico e em azul de aço ferrítico. Para os testes com e_1 de 22 mm não foi possível realizar a instrumentação com extensômetro por não haver espaço o suficiente. As regiões hachuradas da Figura 28 representam a área de contato da garra do equipamento utilizado para a aplicação da carga e a marcação do *grid* com tamanhos de aproximadamente 10x10 mm.

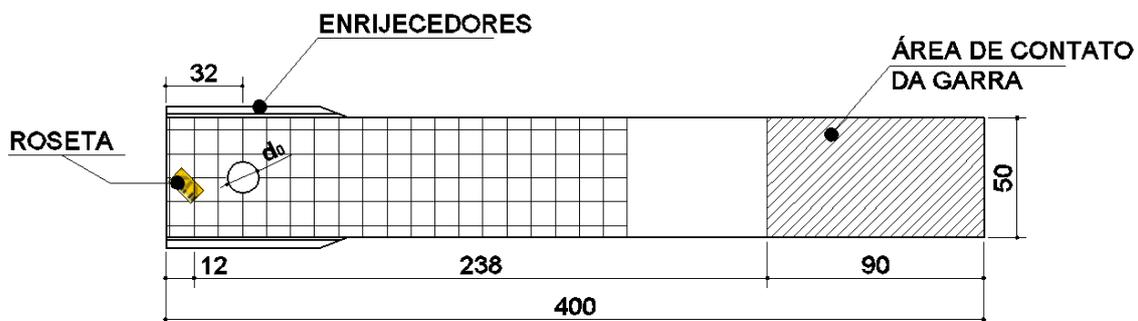
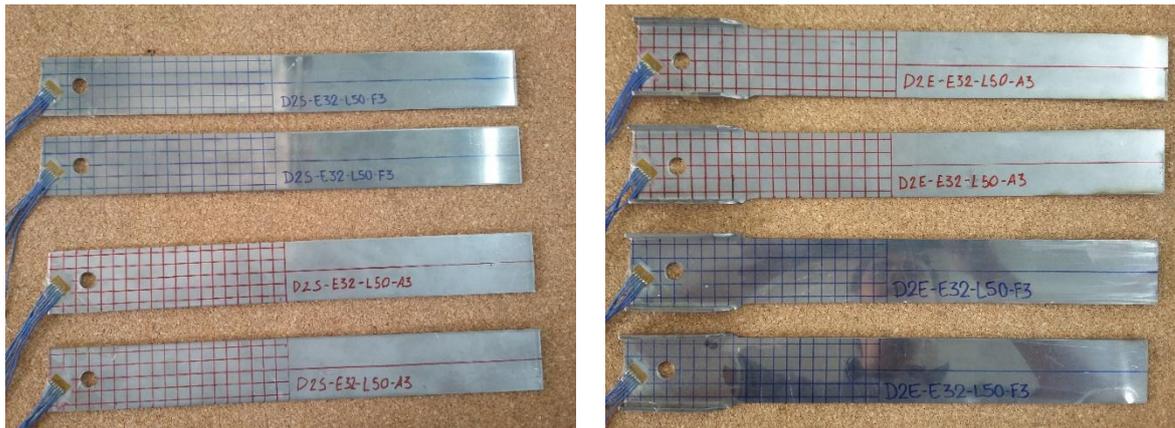


Figura 28 – Ponto de medição da deformação



a) Testes D2S-E32

b) Testes D2E-32

Figura 29 – Alguns dos testes confeccionados com $e_1 = 32$ mm

A máquina utilizada para aplicação da carga foi a da Losenhausen com capacidade de 600 kN situada no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da UERJ, uma fotografia do equipamento é apresentado na Figura 30. A máquina possui um sistema digital onde é possível fazer a leitura durante a realização do ensaio, questão muito importante em ensaios experimentais, já que é possível acompanhar todo o processo, e se necessário, tomar decisões rápidas para se obter o resultado almejado.

**Figura 30 – Máquina Losenhausen de 600kN e sistema analógico**

Como mostrado na Figura 31, foram utilizados transdutores lineares de deslocamento (LVDT). O equipamento eletromecânico transforma movimento retilíneo em corrente elétrica variável, medindo assim, o deslocamento durante a realização do

ensaio, sendo possível, a obtenção da curva carga *versus* deslocamento axial. Para isso, a base do LVDT foi fixada em um ponto fixo com a ponta da “agulha” apoiada na parte do equipamento que se move com a aplicação da carga.



Figura 31 – Instrumentação para medição do deslocamento axial

Para medir o deslocamento para fora do plano (*curling*), também foram utilizados LVDTs posicionados nas laterais do ensaio, como mostrado na Figura 32. O ponto de medição coincide com a linha horizontal do *grid* onde foi colado a roseta, à distância de 12 mm da extremidade da placa.



Figura 32 – Medição do efeito curling

Os *strain gauge* ou extensômetros, assim como o LVDT, foram conectados no sistema de aquisição de dados universal Quantum X-MX1615B da empresa HBM *Test and Measurement* com dois módulos contendo 32 canais. Esse sistema é móvel e de fácil manuseio, facilitando assim, a realização dos ensaios, sendo indicado em experimentos de longa duração. Para cada canal é possível configurar a instrumentação desejada, como célula de carga, extensômetro ou transdutores de deslocamento. Uma imagem do módulo é apresentada na Figura 33.



Figura 33 – Módulo amplificador universal Quantum X-MX1615B [42]

O sistema da HBM possui o programa Catman que converte os dados recebidos em dados acessíveis. Esse programa possui uma interface bem intuitiva e adaptável onde é possível fazer as configurações dos fios da instrumentação escolhida, e os dados após processados podem ser exportados em diversos formatos, tais como, Catman, Matlab, Excel, txt, e etc., facilitando o tratamento dos resultados. A interface do programa Catman é demonstrado na Figura 34.



Figura 34 – Interface do programa Catman [42]

3.5 Resultados experimentais

Inicialmente, são apresentados os resultados obtidos para todas as ligações separados apenas conforme o tipo de aço, onde a Figura 35 e Figura 36 apresentam os gráficos carga *versus* deslocamento axial de cada teste. As legendas foram dispostas em ordem decrescente da carga última, e as ligações destacadas em negrito não alcançaram a carga última devido a uma ruptura não prevista no parafuso.

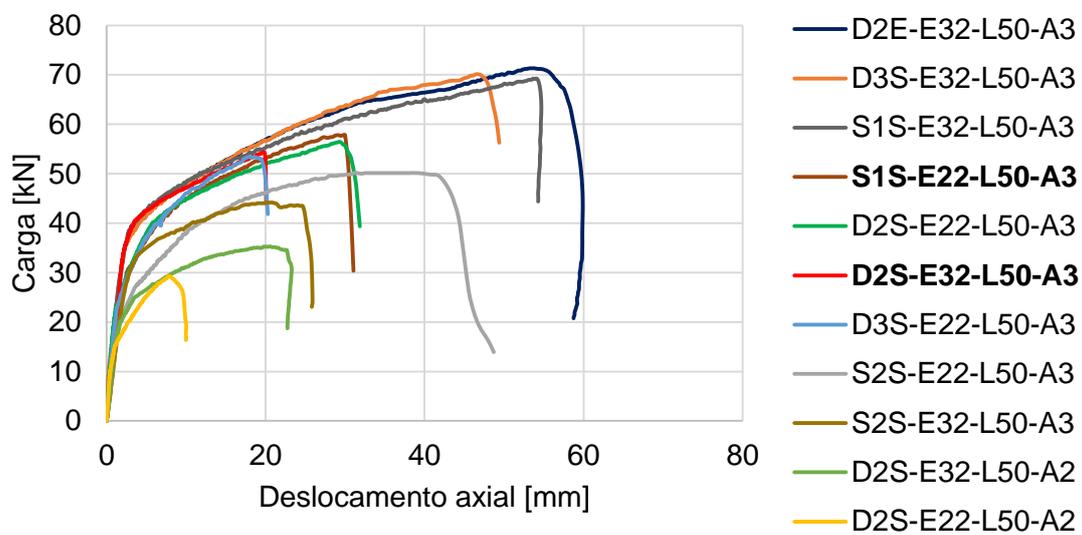


Figura 35 – Carga versus deslocamento axial – Austenítico

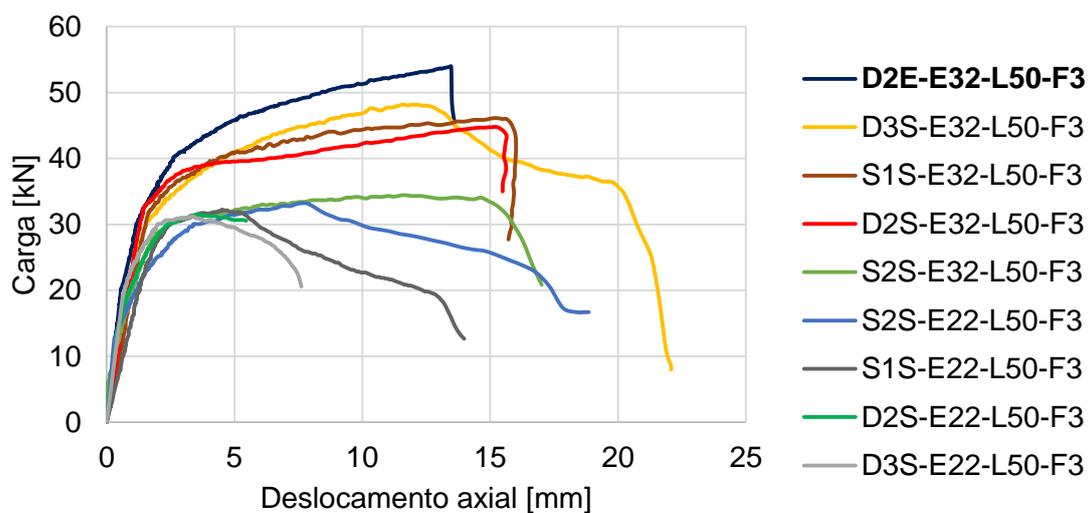


Figura 36 – Carga versus deslocamento axial – Ferrítico

Uma tabela com os valores de carga última dos testes realizados, juntamente com o deslocamento correspondente e os modos de falhas das ligações observados nos ensaios experimentais, são exibidos na Tabela 16 e Tabela 17 para os aços inoxidáveis do tipo austenítico e ferrítico, respectivamente.

Tabela 16 – Resultados experimentais – Austenítico

Teste	Código	Carga [kN]	Desloc. [mm]	Modo de Falha
1	D2E-E32-L50-A3	71,33	53,22	esmagamento + <i>curling</i> ¹⁾
2	D2S-E22-L50-A2	29,34	7,73	esmagamento + rasgamento na extremidade ²⁾
3	D2S-E22-L50-A3	56,47	29,30	esmagamento + rasgamento ²⁾
4	D2S-E32-L50-A2	35,27	19,78	esmagamento + <i>curling</i> ¹⁾
5	D2S-E32-L50-A3	54,35	19,83	cisalhamento no parafuso + <i>curling</i>
6	D3S-E22-L50-A3	53,38	17,81	esmagamento + rasgamento
7	D3S-E32-L50-A3	70,11	46,42	esmagamento + rasgamento em bloco (cisalhamento + tração)
8	S1S-E22-L50-A3	57,79	28,95	cisalhamento no parafuso ²⁾
9	S1S-E32-L50-A3	69,26	53,64	esmagamento + <i>curling</i>
10	S2S-E22-L50-A3	50,13	31,13	<i>pull-through</i> + <i>curling</i> + <i>pulling into line</i>
11	S2S-E32-L50-A3	44,17	20,04	<i>pull-through</i> + <i>curling</i> + <i>pulling into line</i>

1) Para esses testes ocorreu o *curling* em apenas um lado.

2) Para esses testes ocorreu o *curling* com pequena intensidade e apenas em um lado.

Tabela 17 – Resultados experimentais – Ferrítico

Teste	Código	Carga [kN]	Desloc. [mm]	Modo de Falha
12	D2E-E32-L50-F3	53,93	13,48	cisalhamento no parafuso + esmagamento
13	D2S-E22-L50-F3	31,50	3,51	esmagamento + rasgamento na extremidade
14	D2S-E32-L50-F3	44,80	15,21	esmagamento + <i>curling</i>
15	D3S-E22-L50-F3	31,18	3,29	esmagamento + rasgamento
16	D3S-E32-L50-F3	48,15	11,53	esmagamento + rasgamento em bloco (cisalhamento + tração)
17	S1S-E22-L50-F3	32,26	4,52	esmagamento + rasgamento na extremidade
18	S1S-E32-L50-F3	46,11	15,13	esmagamento + <i>curling</i>
19	S2S-E22-L50-F3	33,20	7,60	esmagamento + rasgamento em bloco (cisalhamento + tração)
20	S2S-E32-L50-F3	34,45	11,64	<i>pull-through</i> + <i>curling</i> + <i>pulling into line</i>

Para os testes em aço inoxidável do tipo austenítico, ocorreu o *curling* nos modelos 1, 4, 5, 9, 10 e 11, apresentados na Tabela 16, onde todos possuem uma distância entre o eixo do furo e borda igual a 32 mm, com exceção do teste 10, S2S-

E22-L50-A3, que ocorre também o efeito *pulling into line* (fenômeno descrito no capítulo 1 dessa dissertação). Tal fenômeno também ocorre no teste 11.

Já para as ligações com aço ferrítico, Tabela 17, ocorreu o *curling* nos testes 14, 18 e 20, sendo todas com distância e_1 de 32 mm. Para esse tipo de aço, o efeito *pulling into line* ocorreu apenas na ligação com distância entre eixo do furo e borda de 32 mm. Com os resultados já apresentados, é possível perceber a diferença entre o comportamento dos aços inoxidáveis utilizados nesta dissertação, uma vez que o enrijecedor, foi capaz de impedir o efeito *curling* na ligação com aço ferrítico e o fenômeno *pulling into line* para a ligação com $e_1 = 22$ mm só ocorreu para o aço austenítico.

Na Figura 37 é apresentado um organograma da divisão que foi utilizada para análise dos resultados obtidos, onde as numerações em parênteses representam a ordem de apresentação das análises.

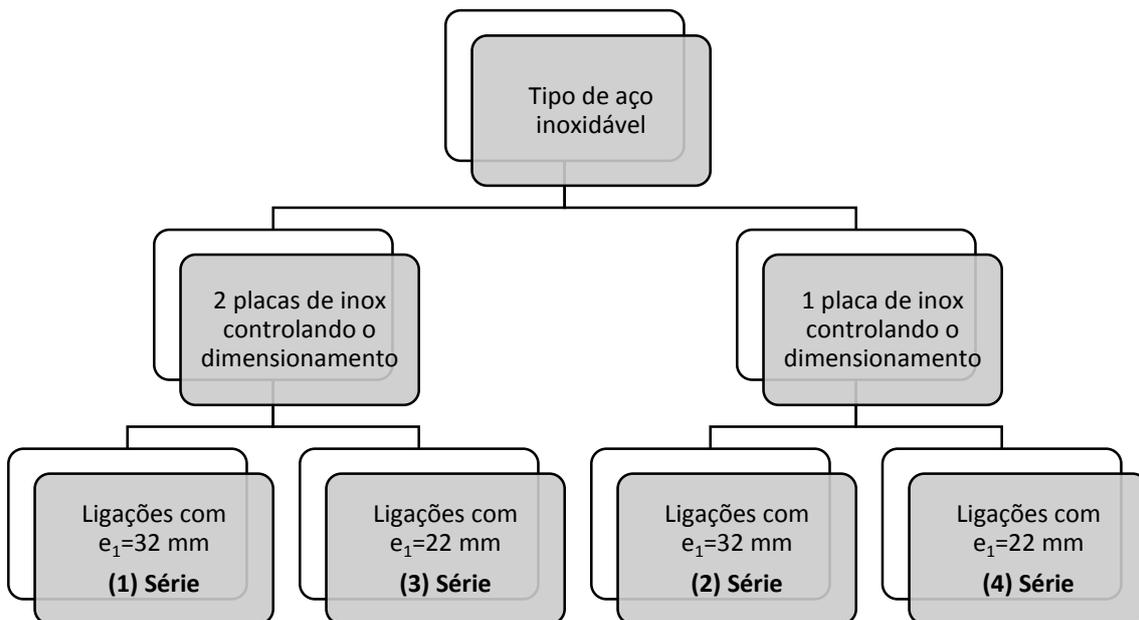


Figura 37 – Fluxograma utilizado para organização dos resultados

Inicialmente, a divisão dos grupos é dada pelo tipo de aço inoxidável, sendo primeiro, apresentado os resultados das ligações com placas de aço do tipo austenítico.

3.5.1 Austenítico

Nesse item, são apresentadas as ligações com placas de aço inoxidável do tipo austenítico, onde os resultados são divididos em mais dois grupos: ligações com duas placas de aço inoxidável controlando o dimensionamento, onde a carga do teste foi dividida por dois para encontrar a correspondente em uma única placa, e ligações com uma placa de aço inoxidável controlando o dimensionamento. Para a primeira é apresentado na Figura 38 as ligações com $e_1 = 32$ mm, sendo a D2E-E32-L50-A3, D2S-E32-L50-A3 e D2S-E32-L50-A2.

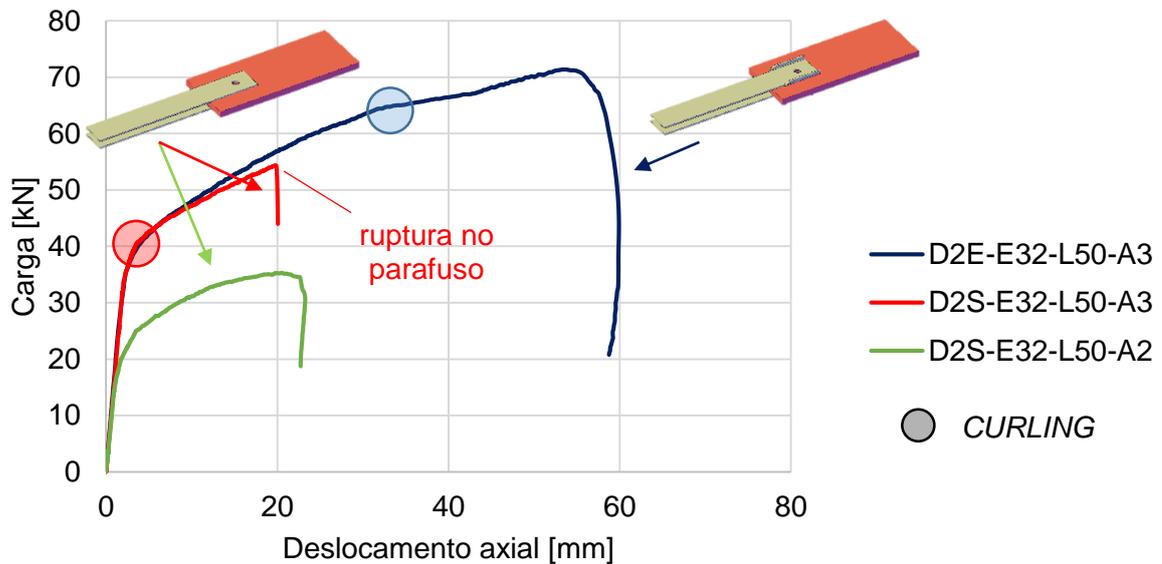


Figura 38 – Carga versus deslocamento axial 1º série – Austenítico

Analisando a figura acima, observa-se que o comportamento das ligações com placas de 3 mm obtiveram um comportamento bem semelhante até a carga máxima alcançada pela ligação sem enrijecedor (D2S-E32-L50-A3). A ruptura dessa ligação ocorreu por um cisalhamento não previsto no parafuso, não sendo assim possível, a obtenção de sua carga última. A Figura 39 apresenta a ruptura no parafuso do teste D2S-E32-L50-A3.

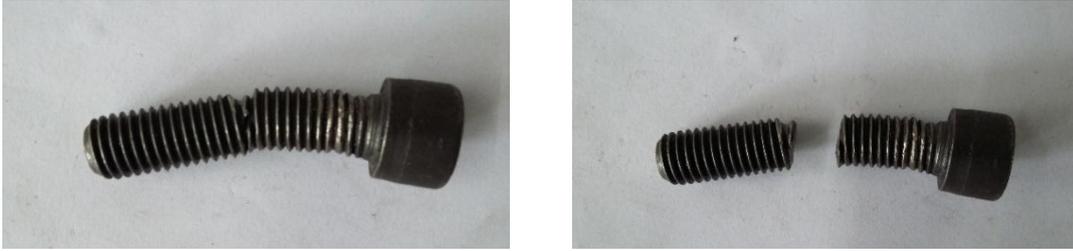
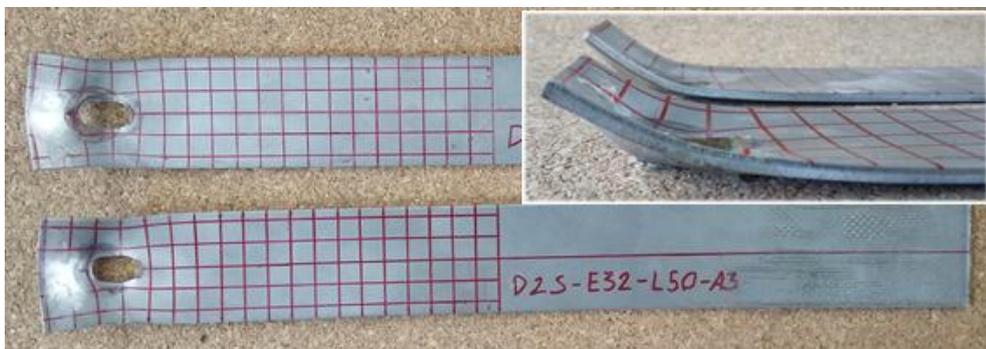


Figura 39 – Ruptura do parafuso do teste D2S-E32-L50-A3

Para o ensaio com placa enrijecida a carga última obtida experimentalmente foi de 71,33 kN para um deslocamento de 53,22 mm, onde foi observado o modo de falha esmagamento da placa com a ocorrência do efeito *curling*. Uma fotografia desse teste após a ruptura é observada na Figura 40(a), onde é apresentado também a deformada da mesma ligação sem enrijecedor (ver Figura 40(b)) para comparação.



(a) Teste D2E-E32-L50-A3



(b) Teste D2S-E32-L50-A3

Figura 40 – Deformada após ruptura da 1ª série - Austenítico

Como exposto na figura acima, é possível perceber a efetividade do enrijecedor em minimizar a ocorrência do efeito *curling*, onde a Figura 40(b) apresentou uma deformação para fora do plano bem superior para o teste D2S-E32-L50-A3. A Figura 41 confirma tal afirmação onde é apresentado as deformações obtidas pelos extensômetros e o deslocamento para fora do plano medidos pelos LVDTs laterais.

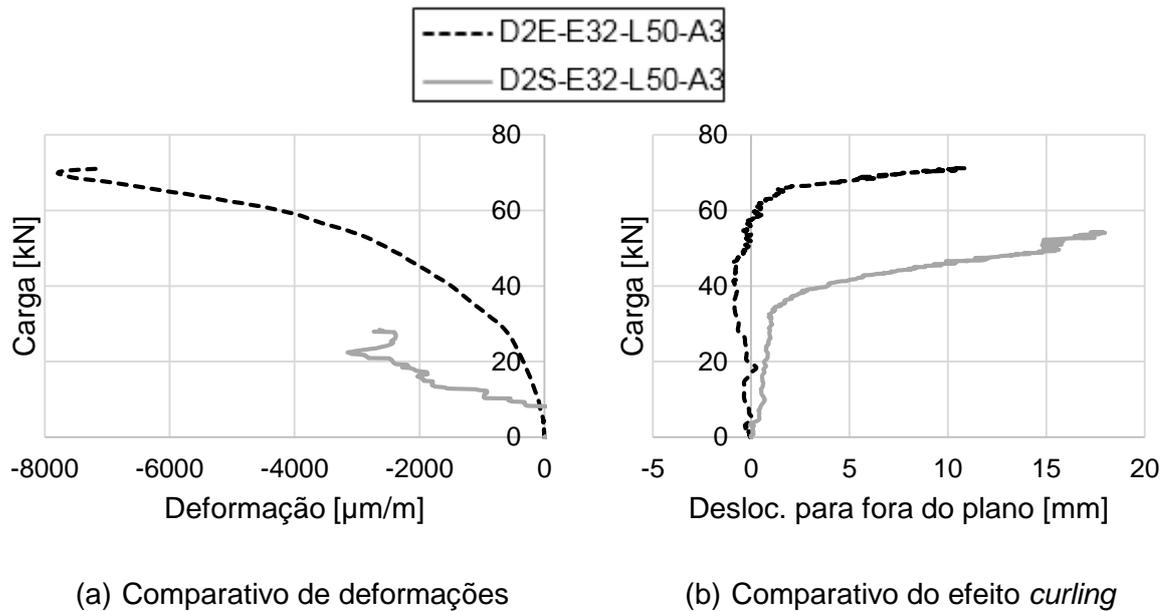


Figura 41 – Carga versus deformação axial e carga versus deslocamento para fora do plano da 1^o série

Na Figura 41(b) é apresentado o deslocamento para fora do plano medido pelo LVDT lateral, onde o *curling* apresentou uma intensidade mais elevada para o teste sem enrijecedor que ocorreu para menores valores de carga, sendo possível concluir que o enrijecedor foi capaz de minimizar a influência do efeito *curling*. Na Figura 41(a) observa-se um valor maior de deformação por compressão na placa com enrijecedor, que ocorre devido ao esmagamento ocasionado pelo fuste do parafuso.

Comparando o item (b) da Figura 41, teste com enrijecedor, com a Figura 38, nota-se que quando começa a desenvolver o efeito *curling* ocorre uma mudança considerável na rigidez da ligação, em aproximadamente 65 kN.

A ligação D2S-E32-L50-A2 que é composta por duas placas de aço inoxidável do tipo austenítico com espessura de 2 mm obteve uma carga máxima de 35,27 kN para um deslocamento de 19,78 mm. Para essa ligação, foi observado o modo de falha esmagamento com a ocorrência do efeito *curling*, porém, o fenômeno ocorreu

em apenas um lado da ligação. Tal fato, pode estar relacionado a existência de uma possível excentricidade na montagem do teste.

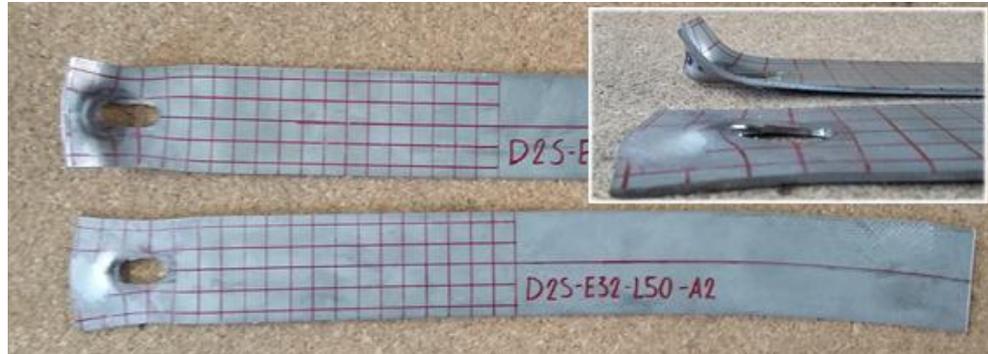


Figura 42 – Deformada após ruptura do teste D2S-E32-L50-A2

A segunda série de dados para o aço austenítico é composta pelas ligações: D3S-E32-L50-A3, S1S-E32-L50-A3, e S2S-E32-L50-A3, sendo curvas carga *versus* deslocamento apresentadas na Figura 43. A primeira (D3S-E32-L50-A3), é uma ligação de dois planos de cortes composta por três placas de aço inoxidáveis, sendo a placa central impedida de ocorrer o efeito *curling* controlando a carga máxima do ensaio. A segunda (S1S-E32-L50-A3) é uma ligação com um plano de corte, composta por uma placa de aço inoxidável e outra de aço carbono de maior espessura, ocorrendo o efeito *curling* na placa de aço inoxidável. E a terceira (S2S-E32-L50-A3), são duas placas de aço inoxidável conectadas por um parafuso sob um plano de corte, onde é observado a ocorrência de dois fenômenos: *curling* e *pulling into line*.

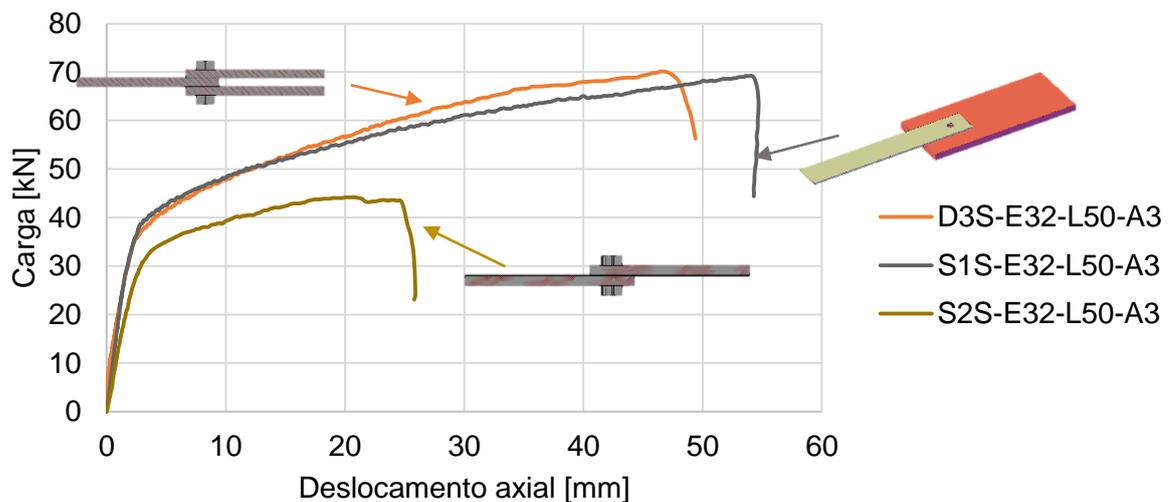
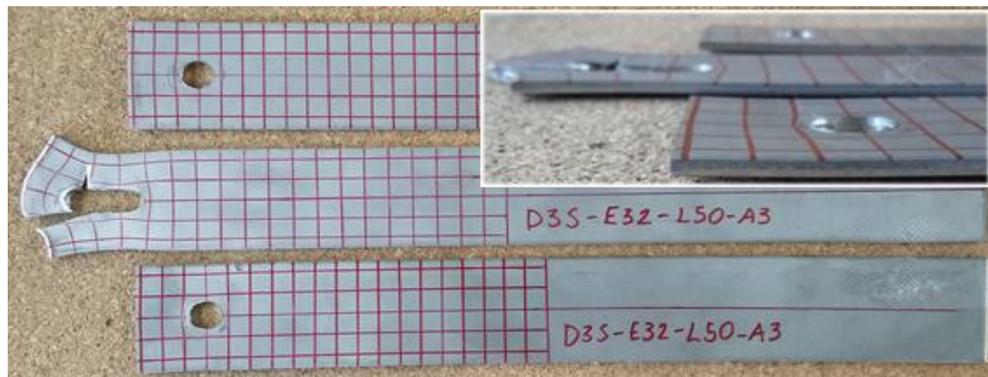


Figura 43 –Carga versus deslocamento axial 2º série – Austenítico

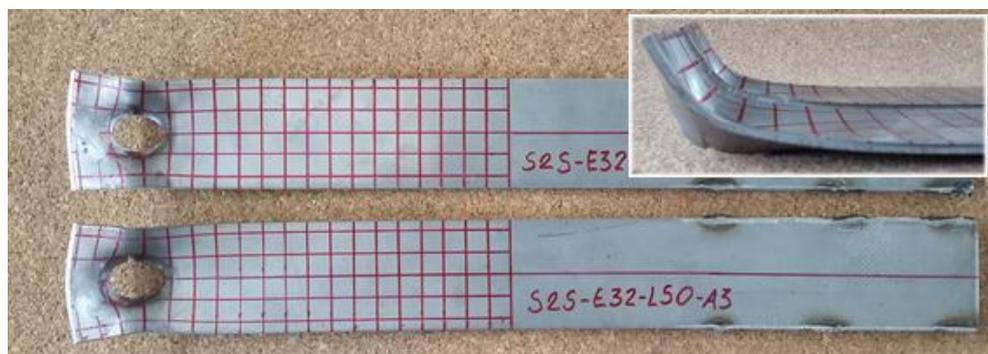
A carga última da ligação sem o efeito *curling* foi de 70,11 kN para um deslocamento correspondente de 46,42 mm. Na Figura 44 (a) é apresentada sua deformada onde observa-se que a ruptura foi por esmagamento acrescido do rasgamento em bloco (*block tearing*), que é o rasgamento em duas direções da placa, uma por cisalhamento no sentido axial causado pelo fuste do parafuso e outra por tração no sentido da área líquida.



(a) Deformada D3S-E32-L50-A3



(b) Deformada S1S-E32-L50-A3



(c) Deformada S2S-E32-L50-A3

Figura 44 – Deformada após ruptura da 2ª série - Austenítico

A ligação S1S-E32-L50-A3 alcançou uma carga última de 69,26 kN para um deslocamento de 53,64 mm, onde o modo de falha foi o esmagamento com o efeito *curling*, como mostrado na Figura 44(b). Comparando a ruptura dessa ligação com a terceira (S2S-E32-L50-A3), observa-se que o efeito *curling* da segunda foi relativamente inferior, 7,6 mm contra 17,6 mm, sendo que para essa última não foi medido o deslocamento para fora do plano até o final do ensaio, já que por segurança, foi necessário a remoção dos LVDTs. A Figura 45(b) apresenta o gráfico carga *versus* deslocamento para fora do plano de ambas as ligações. Na Figura 45(a) observa-se que a ligação S2S-E32-L50-A3 sofreu uma deformação de compressão superior ao outro teste.

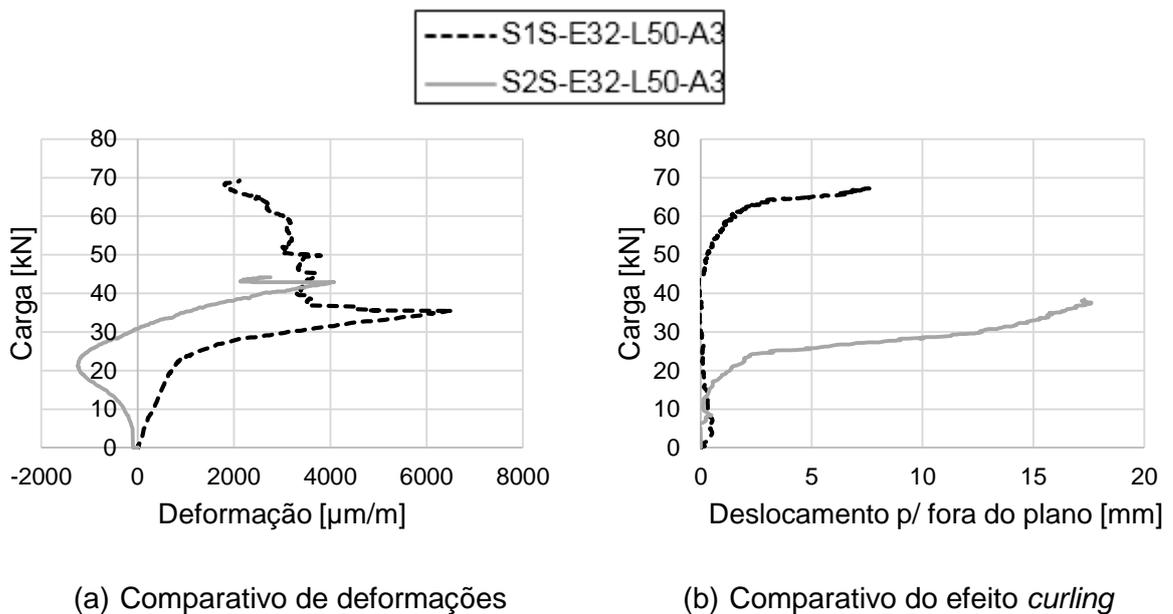


Figura 45 – Carga *versus* deformação axial e carga *versus* deslocamento para fora do plano da 2ª série

Na ligação S2S-E32-L50-A3, o efeito *curling* foi capaz de influenciar a ruptura da ligação, levando ao surgimento de mais um fenômeno: o *pulling into line*, que ocorre em ligações com cisalhamento simples compostas por placas finas de mesma espessura. A carga de tração, que inicialmente atua com uma pequena excentricidade, induz uma flexão entre as placas e passa a atuar em uma única linha [15]. Na Figura 46 é apresentado a deformada da ligação em questão durante a realização do ensaio.

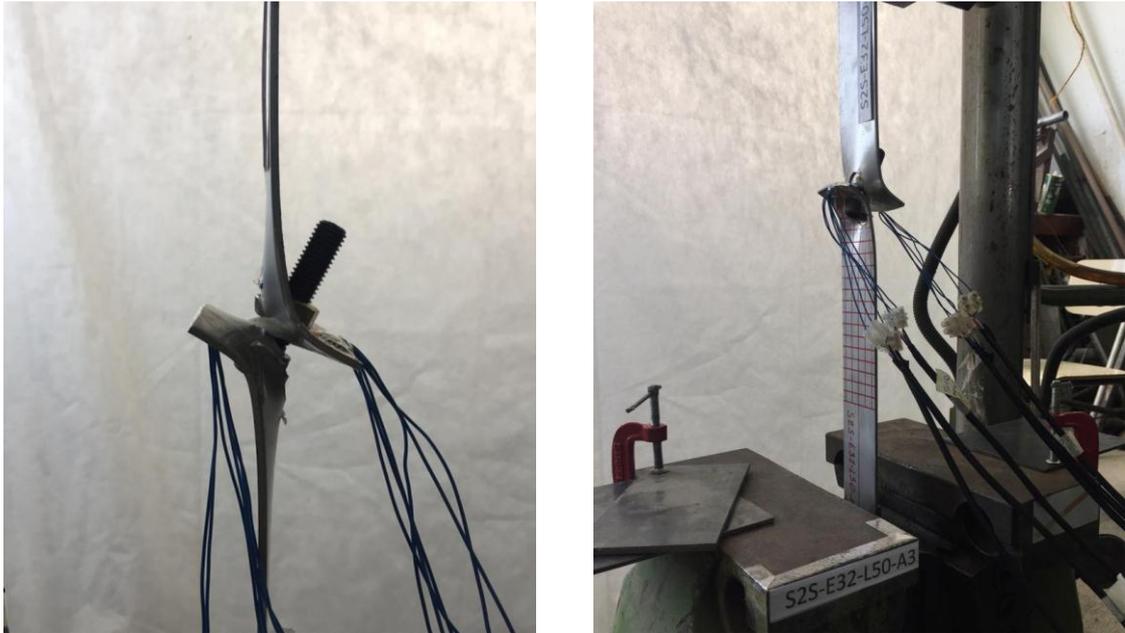


Figura 46 – Deformada do teste S2S-E32-L50-A3

A ligação S2S-E32-L50-A3 obteve uma carga última de 44,17 kN para um deslocamento de 20,04 mm. O modo de falha observado foi o rasgamento da placa para fora do plano (*pull-through*) causado pela cabeça do parafuso e arruela. Contudo, percebe-se que o efeito *curling* juntamente com o efeito *pulling into line* foram capazes de alterar o modo de falha da ligação, fazendo com que houvesse uma ruptura com uma carga relativamente pequena quando comparada com a ligação sem os dois fenômenos, S3S-E32-L50-A3, sendo esta diferença igual a 37%. Em ligações sujeitas a esse modo de falha, a rigidez da arruela e área de contato dessa com a placa da ligação influenciam diretamente em sua resistência última.

Para as séries de dados com $e_1 = 22\text{mm}$ não foram colocadas as rosetas devido a pequena área disponível na região entre o furo e extremidade da placa, como também, não foram utilizados LVDTs laterais para a medição do efeito *curling*, uma vez, que para essa geometria o fenômeno quase não ocorre ou não influencia no comportamento da ligação. O terceiro conjunto de dados é composto pelas ligações D2S-E22-L50-A2 e D2S-E22-L50-A3, ambas com as placas externas controlando o dimensionamento, variando apenas a sua espessura de 2 mm para 3 mm. As curvas carga *versus* deslocamento axial são apresentadas na Figura 47.

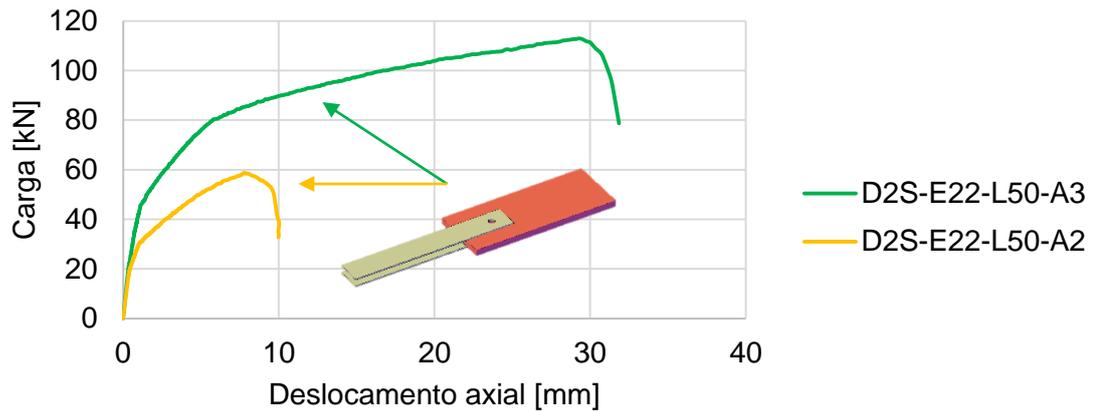
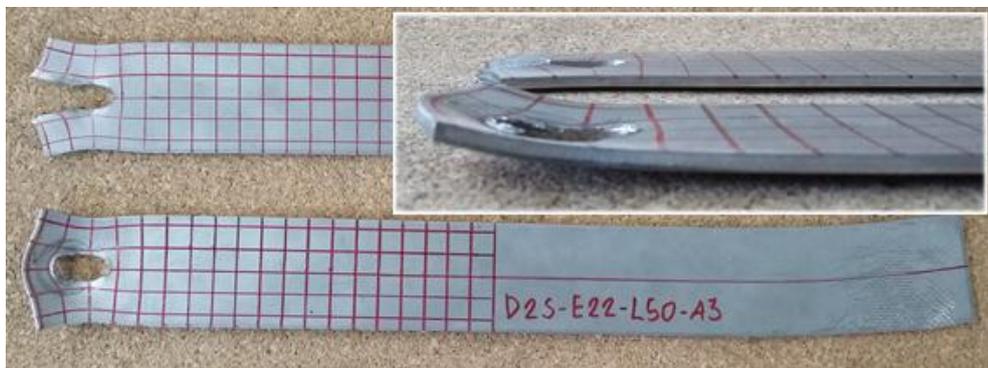


Figura 47 – Carga versus deslocamento axial 3º série – Austenítico

Como apresentado na figura acima, a carga última das ligações foram 29,34 kN com um deslocamento corresponde de 7,73 mm e 56,47 kN para um deslocamento de 29,3 mm para as ligações com espessura de 2 mm e 3 mm, respectivamente. Suas deformadas após a ruptura, são apresentadas na Figura 48.



(a) Teste D2S-E22-L50-A2



(b) Teste D2S-E22-L50-A3

Figura 48 – Deformada após ruptura da 3ª série - Austenítico

Uma diferença de 48% na capacidade de carga das ligações apresentada acima foi observada. Analisando a Figura 48(a), observa-se que a ruptura da ligação ocorreu por esmagamento, chegando a atingir o rasgamento na extremidade de uma das placas (*end tearing*). No item (b) da mesma figura, é demonstrado o modo de falha da ligação com placas de 3 mm, onde percebe-se que o modo de falha da ligação também foi o esmagamento da placa. Em um dos pares de placas, é observado uma pequena deformação para fora do plano, sendo esse fenômeno não significativo devido a pequena relação d/e_1 .

A quarta série de dados para as ligações de aço austenítico, são ligações em que apenas uma placa de aço inoxidável controla o dimensionamento e com uma distância $e_1 = 22\text{mm}$, sendo a D3S-E22-L50-A3, S1S-E22-L50-A3 e S2S-E22-L50-A3. As curvas carga *versus* deslocamento axial da série é apresentada na Figura 49.

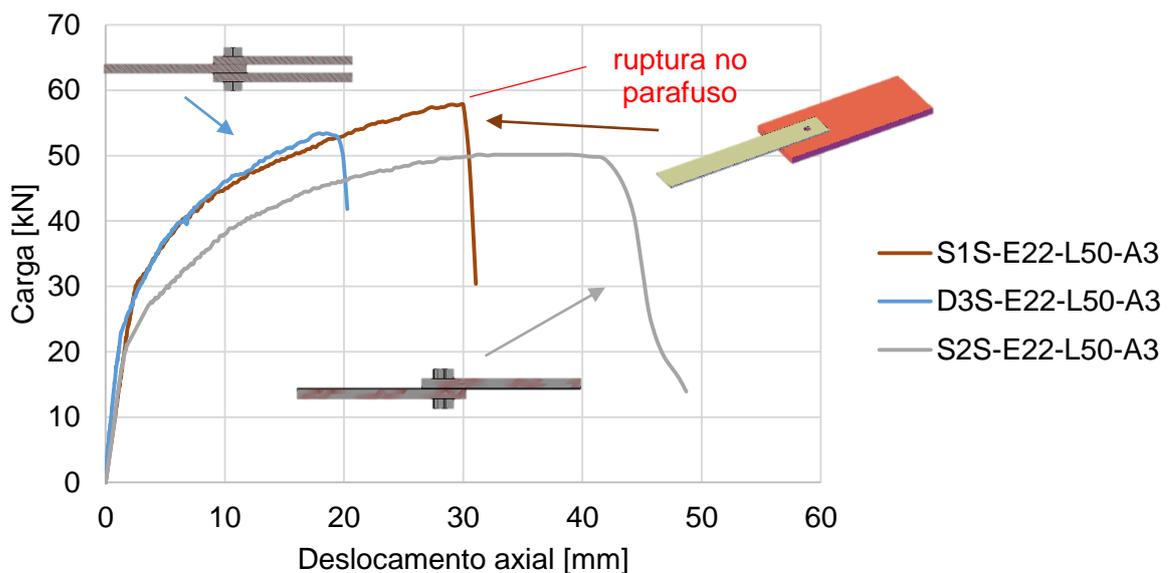
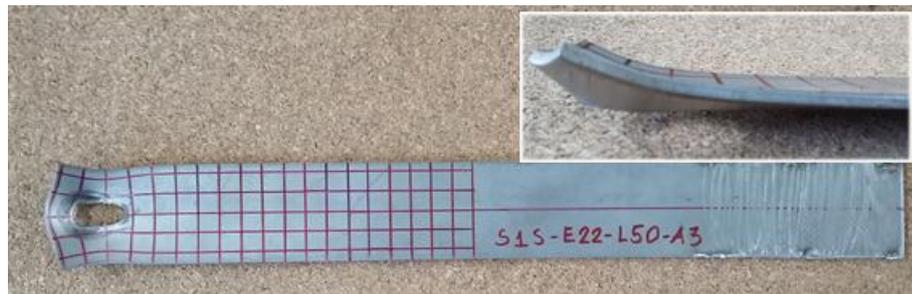


Figura 49 – Carga *versus* deslocamento axial da 4ª série - Austenítico

A ligação composta por três placas de aço inoxidável obteve uma carga última de 53,38 kN para um deslocamento de 17,81 mm. E o modo de falha que caracterizou a ruptura do teste foi o rasgamento da placa por cisalhamento causado pelo fuste do parafuso. A deformada dessa ligação, juntamente com as demais da série, são apresentadas na Figura 50.



(a) Teste D3S-E22-L50-A3



(b) Teste S1S-E22-L50-A3



(c) Teste S2S-E22-L50-A3

Figura 50 – Deformada após ruptura da 4ª série - Austenítico

Para a ligação S1S-E22-L50-A3 a carga última obtida foi 57,79 kN com um deslocamento correspondente de 28,95 mm. Seu modo de falha foi a ruptura do parafuso por cisalhamento, como apresentado na Figura 51.

**Figura 51 – Ruptura do parafuso do teste S1S-E22-L50-A3**

A ruptura no parafuso ocorreu em uma carga de 82% da carga máxima prevista de resistência do parafuso, utilizando as propriedades fornecidas pelo fabricante. Uma investigação com ensaios de caracterização do parafuso seria necessária para uma melhor compreensão do seu comportamento. E alguns fatores externos, como um possível desalinhamento na montagem do ensaio e erros provenientes do processo de corte furação da placa podem ter contribuído para a ruptura em questão. Na Figura 52 é apresentado a deformada da ligação S1S-E22-L50-A3.



Figura 52 – Deformada após ruptura do teste S1S-E22-L50-A3

Para todos os ensaios com um plano de corte (S1S e S2S), com o objetivo de evitar uma excentricidade entre as resultantes de tração, foram soldados complementos de chapas em ambos os lados da ligação, deixando-as com espessuras equivalentes na região de contato com as garras, como ilustrado na Figura 53. Mesmo ocorrendo a ruptura no parafuso do teste S1S-E22-L50-A3, já foi possível verificar a ocorrência do efeito *curling*, Figura 50(b), onde o fenômeno induzia ao modo de falha esmagamento. Para o ensaio do item (a) da mesma figura, que possui o efeito *curling* impedido, o modo de falha foi o rasgamento da placa.



Figura 53 – Dispositivo utilizado para evitar excentricidades adicionais dos testes S1S e S2S

O ensaio S2S-E22-L50-A3 é uma ligação com duas placas de aço inoxidável com o parafuso sob um plano de corte. A carga última obtida no ensaio foi de 50,13 kN para um deslocamento de 31,13mm, 13% inferior ao teste S1S-E22-L50-A3 que

também é uma ligação com um plano de corte com a placa de aço inoxidável controlando o dimensionamento. O modo de falha da ligação S2S-E22-L50-A3 foi o rasgamento para fora do plano, induzido pelos efeitos *curling* e *pulling into line*. Na Figura 54 é demonstrado a deformada da ligação durante a realização do ensaio.

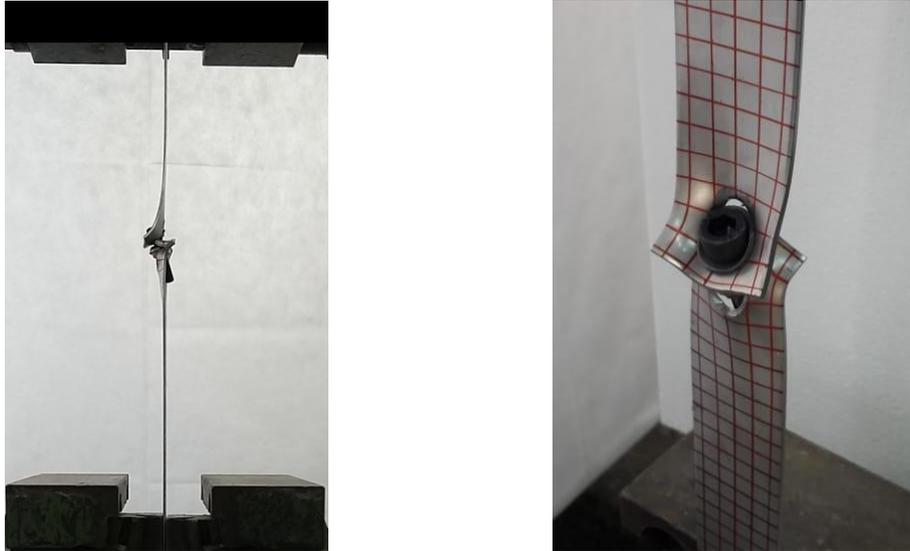


Figura 54 – Deformada do teste S2S-E22-L50-A3

Com os dados já apresentados, é possível afirmar que o efeito *curling* induziu a ocorrência do fenômeno *pulling into line*, que juntos, foram capazes de fazer com que a ligação rompesse por *pull-through*, diferentemente da ligação S1S-E22-L50-A3, que possui uma placa de aço carbono com rigidez o suficiente para impedir esse tipo de ruptura.

3.5.2 Ferrítico

A partir deste ponto, serão apresentados os resultados das ligações de aço inoxidável ferrítico, onde foram realizados 9 testes da mesma configuração do austenítico. A estrutura organizacional será a mesma adotada para o aço austenítico e apresentada na Figura 37, sendo apenas agrupado a série primeira e terceira série, já que essa última possui apenas uma ligação. Logo, a primeira série de ligações com aço ferrítico será compostas pelas ligações: D2E-E32-L50-F3, D2S-E32-L50-F3, e D2S-E22-L50-F3, ou seja, para a ligação enrijecida com $e_1 = 32\text{mm}$ e para as sem

enrijecedores com $e_1 = 32\text{mm}$ e $e_1 = 22\text{mm}$, respectivamente, todas com dois planos de cortes. Para o modelo com enrijecedor, ocorreu uma ruptura não prevista por cisalhamento no parafuso, sendo que este teste usou um estojo ASTM A193-B7 de $\frac{1}{2}$ " de aço liga. Esse tipo de aço possui uma tensão última de tração de 860 MPa e de escoamento (0,2% de deformação) de 720 MPa [43]. Uma fotografia do parafuso, após a ruptura, é apresentada na Figura 55.



Figura 55 – Ruptura no parafuso do teste D2E-E32-L50-F3

As curvas carga *versus* deslocamento de todas as ligações da série apresentada, são demonstradas na Figura 56, onde é observado os seguintes valores de carga última e deslocamento correspondente em ordem decrescente: 53,93 kN para 13,48 mm (D2E-E32-L50-F3), 44,80 kN para 15,21 mm (D2S-E32-L50-F3) e 31,50 kN para 3,51 mm (D2S-E22-L50-F3). Mesmo com a ocorrência do modo de falha não previsto para a ligação enrijecida, já foi possível observar uma diferença de 17% quando comparado com a placa sem enrijecedor de mesma distância e_1 . Este resultado comprova a eficiência do reforço projetado para minimizar o efeito *curling*. A Figura 58(a) apresenta a deformada da ligação com enrijecedor após ruptura, onde observa-se que o reforço foi capaz de impedir a deformação para fora do plano.

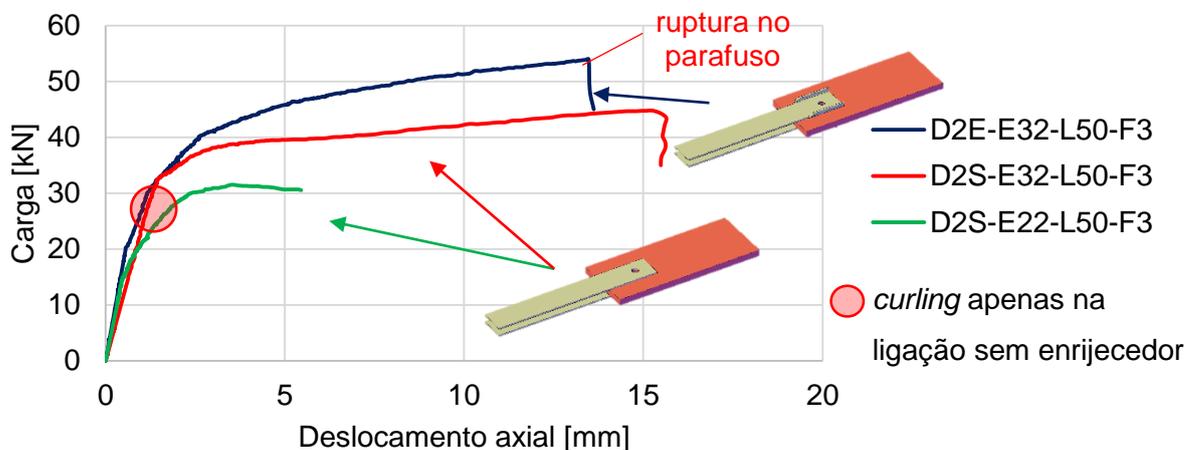


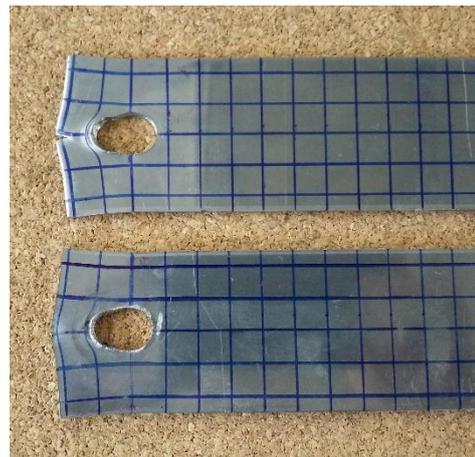
Figura 56 –Carga versus deslocamento axial 1ª e 3ª série - Ferrítico

O modo de falha observado na ligação sem enrijecedor, com $e_1 = 32\text{mm}$, foi o esmagamento da placa com o efeito *curling*. Já para a ligação com $e_1 = 22\text{mm}$, não ocorreu o fenômeno e a ruptura se caracterizou por esmagamento com rasgamento na extremidade, o que confirma que a ocorrência do efeito *curling* está associado aos parâmetros geométricos da ligação. Outro ponto importante, foi a diferença entre as cargas últimas dessas ligações de 30% para o acréscimo da razão e_1/d de 0,545 para 0,375.

Comparando a deformada do teste D2S-E22-L50-F3 com o teste D2S-E22-L50-A3, ligações de mesma geometria com aços diferentes, observa-se a desigualdade do comportamento dos aços inoxidáveis analisados, já que o teste com aço austenítico, apresentou um indício do efeito *curling* e um alongamento do furo bem superior, Figura 57. Tal distinção está associada a capacidade de deformação.



(a) D2S-E22-L50-A3



(b) D2S-E22-L50-F3

Figura 57 – Comparação entre o aço austenítico e ferrítico (DES-E22-L50)

Na Figura 59, são apresentadas as curvas carga *versus* deformação e carga *versus* deslocamento para fora do plano dos modelos com e sem enrijecedor de aço ferrítico. Sendo comprovado mais uma vez, pela medição do LVDT lateral, a efetividade do enrijecedor do teste D2E-E32-L50-F3.

Analisando a Figura 59(a), verifica-se que as deformações das ligações começam a apresentar valores significativos para uma mesma grandeza de carregamento, próximo aos 40kN, e com sinais opostos, ou seja, para a ligação com enrijecedor (sem o efeito *curling*) predomina deformações de compressão, e para a outra que ocorre o fenômeno, há a deformações de tração.



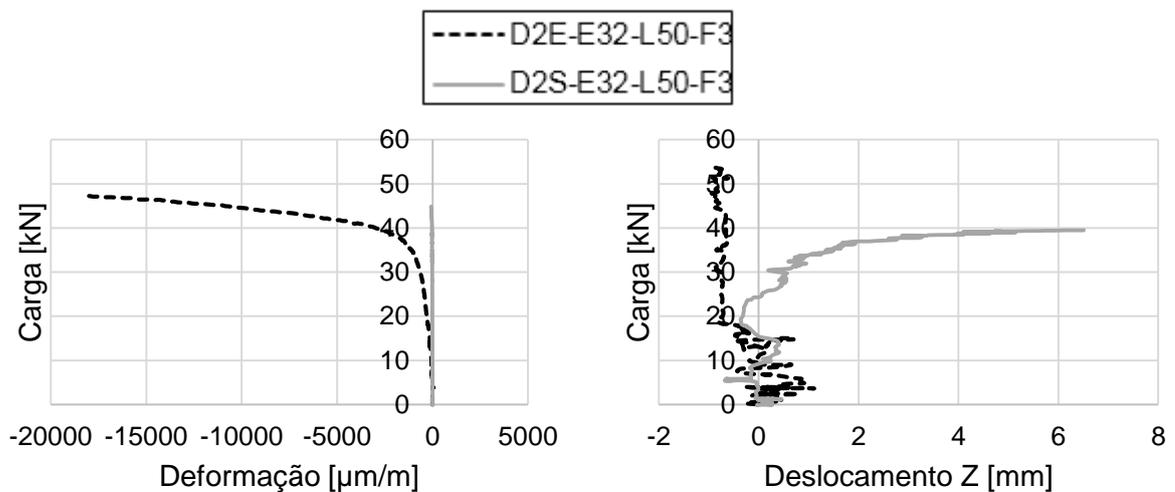
(a) D2E-E32-L50-F3



(b) D2S-E32-L50-F3

Figura 58 – Deformada da 1ª série - Ferrítico

Como demonstrado na Figura 59(b) é possível observar que quando inicia o efeito *curling* na ligação sem enrijecedor (próximo aos 30kN), ocorre uma mudança repentina na rigidez da ligação, como apresentado na Figura 56. Para esse teste não foi possível verificar as deformações com o extensômetro, o que deve estar associado a deformação para fora do plano da placa.



(a) Comparativo de deformações

(b) Comparativo do efeito *curling***Figura 59 – Carga versus deformação axial e carga versus deslocamento para fora do plano da 1ª série**

A segunda série de dados com placas de aço ferrítico são as ligações: D3S-E32-L50-F3, S1S-E32-L50-F3 e S2S-E32-L50-F3, todas com um plano de corte e com $e_1 = 32$ mm. A primeira dessa série, obteve uma carga última de 48,15 kN com um deslocamento de 11,53 mm, como apresentado na Figura 60. Seu modo de falha foi o esmagamento da placa com rasgamento em bloco, ocorrendo a ruptura por cisalhamento e tração nas extremidades da placa central, Figura 61(a).

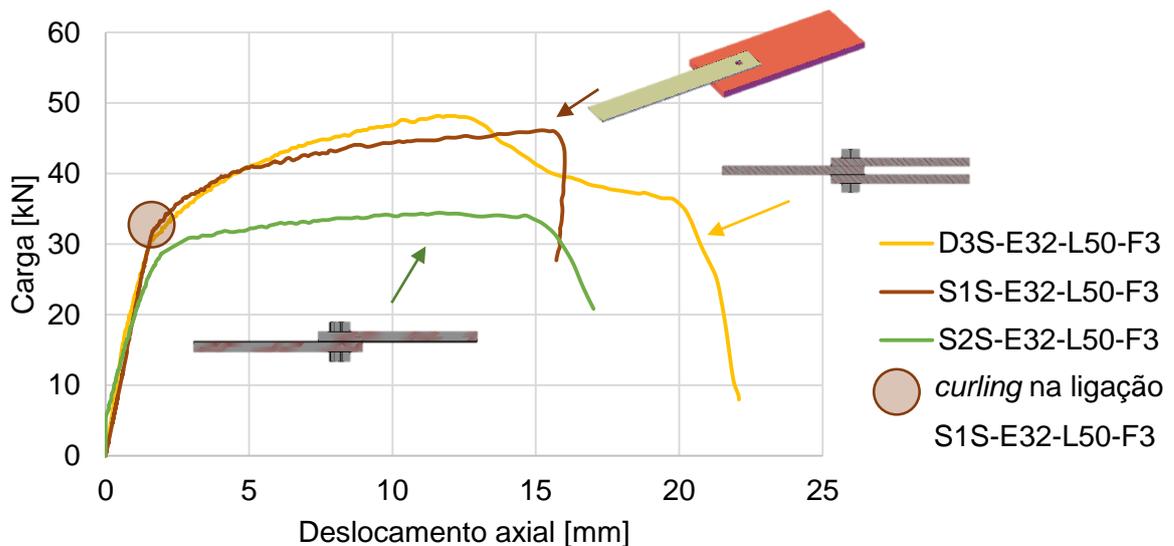


Figura 60 – Carga versus deslocamento axial da 2ª série - Ferrítico

Na ligação S1S-E32-L50-F3, ocorreu o esmagamento com o efeito *curling*, sendo obtido uma carga última de 46,11 kN, 4% inferior ao teste com restrição do efeito *curling*, D3S-E32-L50-F3. A deformada da placa é apresentada na Figura 61(b). Já para a ligação S2S-E32-L50-F3, o modo de falha foi o *pull-through* com a ocorrência do *curling* e *pulling into line*. A carga última foi de 34,45 kN para um deslocamento de 11,64 mm, e sua deformada é apresentada na Figura 61(c). Com a ocorrência dos fenômenos citados na ligação S2S-E32-L50-F3, houve uma redução da carga última de 28%, sendo esse valor relativamente alto, porém, inferior as ligações com aço austenítico, que foram de 37%. Sendo assim, é possível concluir que a influência dos fenômenos apresentados é maior para o aço austenítico.

Como exposto na Figura 62(b) para a ligação S1S-E32-L50-F3, é possível observar que quando ocorre o efeito *curling*, há a queda da rigidez da ligação (aproximadamente aos 32 kN), como mostrado na Figura 60. As deformações de

ambas as ligações da Figura 62 tiveram um comportamento semelhante, porém, cada uma com sua ordem de capacidade de carga.

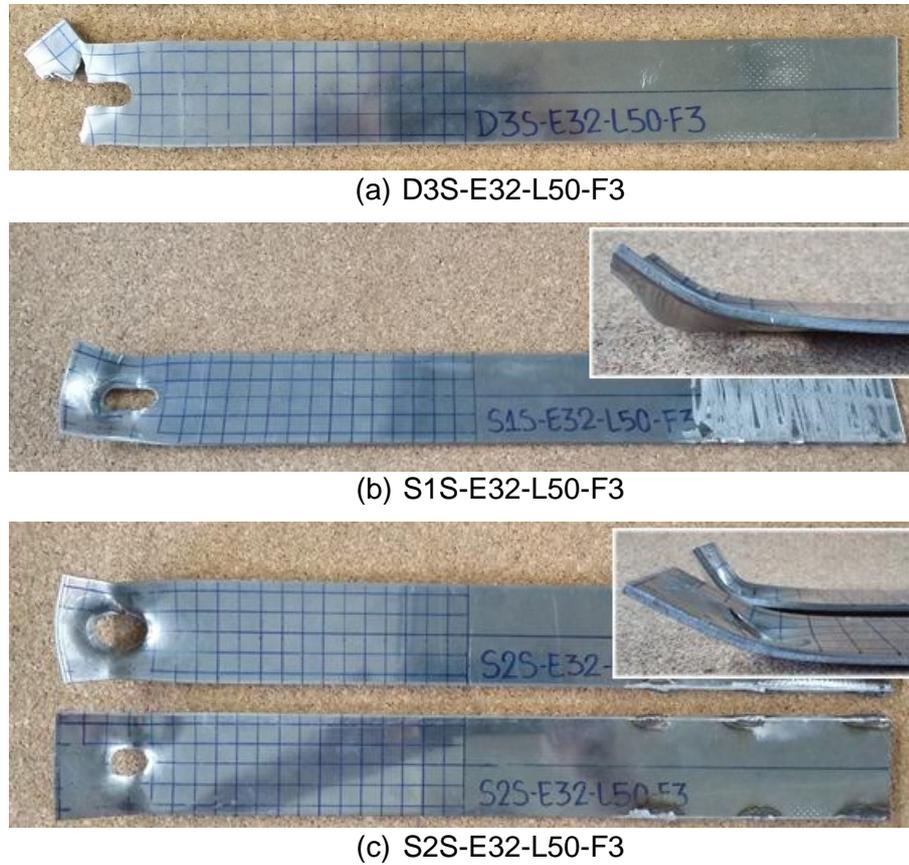


Figura 61 – Deformada após ruptura da 2ª série - Ferrítico

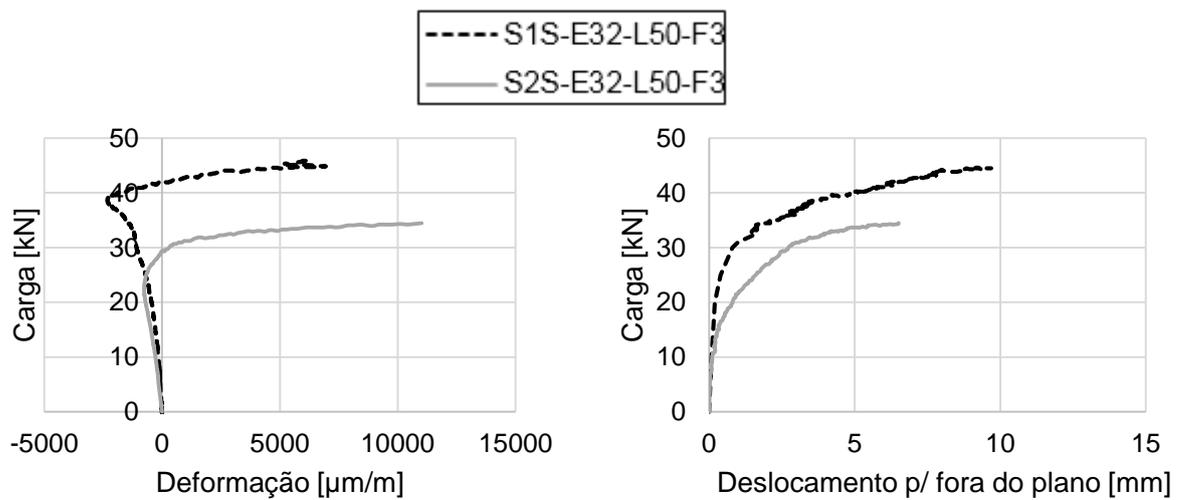


Figura 62 – Carga versus deformação axial e carga versus deslocamento para fora do plano da 2ª série

Como apresentado na figura acima, para a ligação S2S-E32-L50-F3, não há uma mudança da rigidez da ligação influenciada de forma direta conforme ocorre o efeito *curling*, como aconteceu na ligação do mesmo tipo com aço austenítico, S2S-E32-L50-F3. Contudo, os fenômenos citados influenciaram o modo de falha da ligação que diminuiu, consideravelmente, a sua resistência última.

A última série de dados das ligações com aço ferrítico são compostas pelas: D3S-E22-L50-F3, S1S-E22-50-F3 e S2S-E22-L50-F3. A ligação de dois planos de cortes composta por 3 placas obteve uma carga última de 31,18 kN com um deslocamento de 3,29 mm, como apresentado na Figura 63. O modo de falha observado foi o esmagamento da placa chegando a ocorrer o rasgamento por cisalhamento, sendo esse demonstrado na Figura 64 (a). Como almejado, as placas externas impediram a ocorrência do efeito *curling* na placa central que controlou o dimensionamento, porém não fazendo diferença na resistência última da ligação, quando comparada com as demais, devido à baixa relação e_1/d .

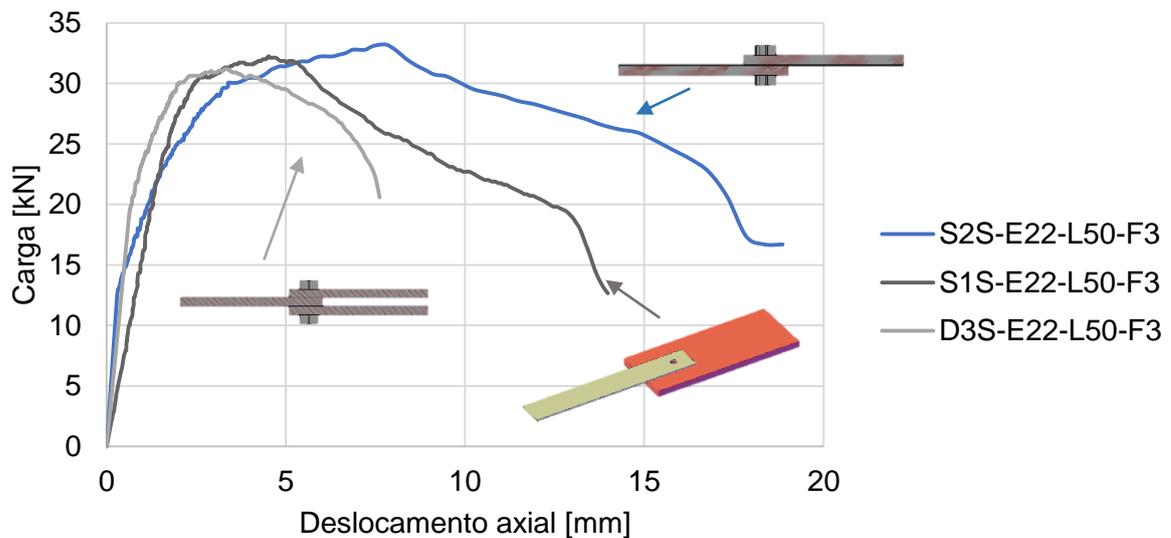


Figura 63 – Carga versus deslocamento axial 4ª série - Ferrítico

A ligação S1S-E22-L50-F3 atingiu uma carga última de 32,26 kN com um deslocamento correspondente de 4,52 mm. A Figura 64 (b) apresenta a sua deformada após a ruptura, onde é possível perceber, que o modo de falha foi o esmagamento com rasgamento na extremidade da placa. Já a ligação S2S-E22-L50-F3, com um plano de corte e composta por placas de mesma espessura, obteve a carga última de 33,2 kN com um deslocamento de 7,6 mm. Seu modo de falha foi o

esmagamento da placa chegando a ocorrer o rasgamento em bloco, como mostrado na Figura 64(c).



(a) Teste D3S-E22-L50-F3



(b) Teste S1S-E22-L50-F3



(c) Teste S2S-E22-L50-F3

Figura 64 – Deformada da 4ª série - Ferrítico

Com base em todo o programa experimental apresentado, é possível concluir que o efeito *curling* de fato contribui para a redução da capacidade de carga da ligação, sendo essa influência ainda maior para o aço austenítico. Quando ocorre a combinação desse efeito com o fenômeno *pulling into line*, a redução da carga última se torna ainda maior, chegando em valores de 37% e 28% para os aços inoxidáveis austenítico e ferrítico, respectivamente.

4 ANÁLISE NUMÉRICA E DISCUSSÕES

Nesse capítulo, são apresentados os parâmetros considerados para realização dos modelos numéricos referentes aos ensaios experimentais. Comparações entre eles e com os métodos analíticos apresentados também são realizadas.

Os modelos foram desenvolvidos no programa de elementos finitos Abaqus/CAE 6.14 [44], onde foram realizadas análises estáticas não lineares física e geométrica por meio de elementos sólidos do tipo C3D8 em todas as partes do modelo. Tal elemento é um hexaedro composto por 8 nós lineares totalmente integrado. Esse tipo de elemento é mais indicado para análise de ligações aparafusadas com superfícies de contatos [15]. No programa, foi inserido o contato do tipo *surface-to-surface* entre cada elemento que compõe a ligação: corpo do parafuso e a região do furo das placas; entre as superfícies da arruela, cabeça do parafuso e as placas; e entre as superfícies laterais das placas. Para facilitar a modelagem, foi considerado um parafuso com duas cabeças, e o fuste sem rosca, sendo apenas necessário a inclusão de um coeficiente de atrito igual a 0,25 [16]. As dimensões dos parafusos seguiram os valores apresentados no programa experimental.

A placa de aço carbono foi modelada com as dimensões reais de 195x381x16 mm. Uma fotografia da placa de base utilizada é apresentada na Figura 65. Essa possui uma resistência suficiente para que o modo de falha ocorra na placa de aço inoxidável.



Figura 65 – Placa de aço carbono

Logo abaixo, é apresentado a Figura 66 que contém os 5 padrões de ligações modelados no programa Abaqus/CAE 6.14 [44], D3S, S2S, D2S, S1S e D2S, que são respectivamente: dois planos de corte com 3 placas de aço inoxidável; um plano de cortes com duas placas de aço inoxidável; dois planos de cortes com duas placas de aço inoxidável; um plano de corte com uma placa de aço inoxidável; e dois planos de cortes com duas placas de aço inoxidável.

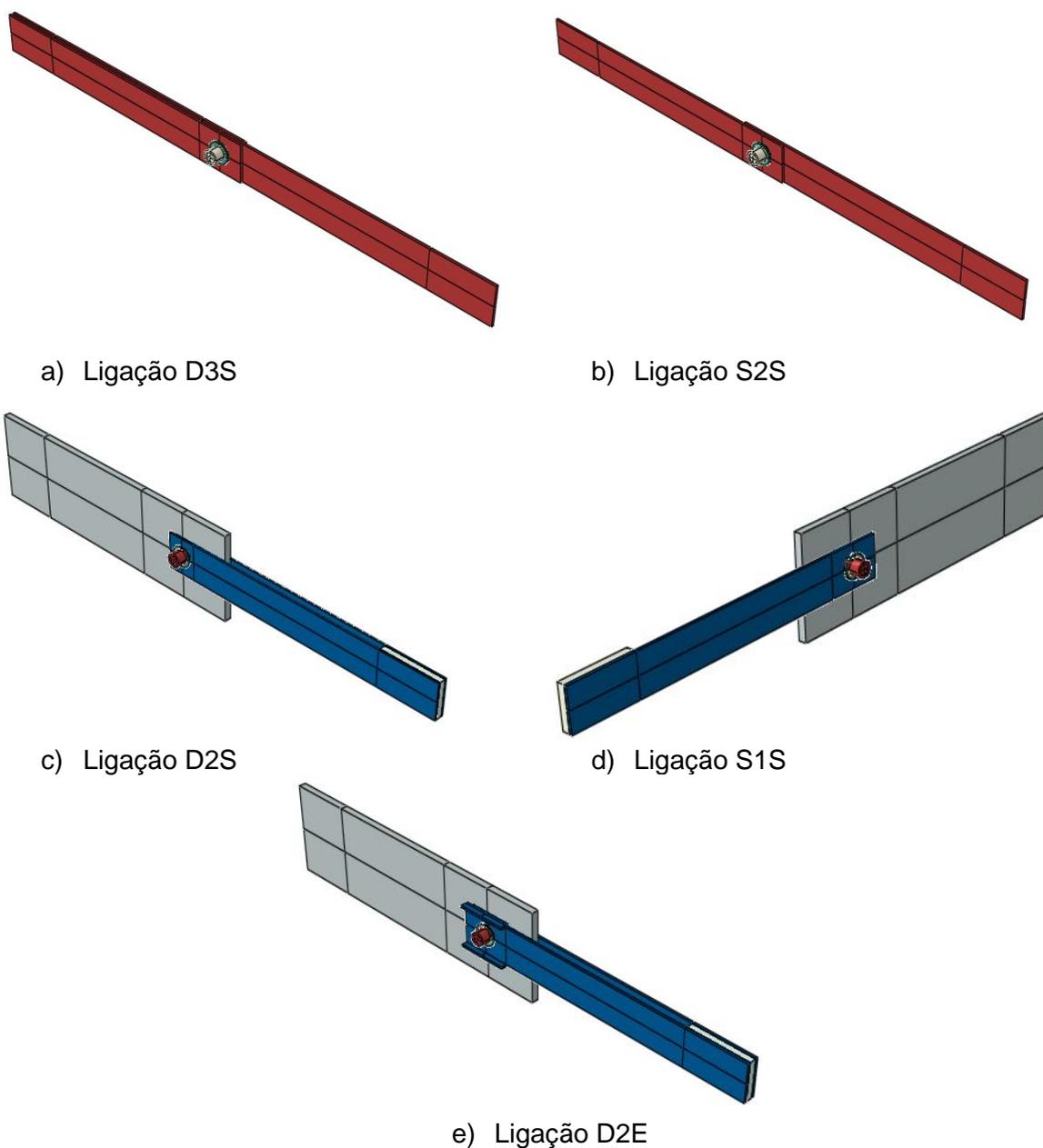


Figura 66 – Tipos de ligações modeladas no Abaqus

Após a criação dos modelos no Abaqus/CAE 6.14 [44] foram definidas as propriedades dos materiais, que foram extraídas dos ensaios de caracterização. Para isso, é necessário inserir os regimes elástico e plástico do material. Para o primeiro, é necessário inserir o módulo de Young e coeficiente de Poisson, onde foram utilizados o valor de 202 GPa para o aço Austenítico e 271 GPa para o ferrítico, ambos com coeficiente de Poisson de 0,3. Já para o segundo é necessário inserir pares da curva tensão *versus* deformação, sendo necessário a utilização da tensão verdadeira, σ_t , e deformação verdadeira, ε_t , que são calculadas pela Equações (41) [19], uma vez que os valores nominais não consideram a estricção da seção transversal do material.

$$\begin{aligned}\sigma_t &= \sigma_n \cdot (1 + \varepsilon_n) \\ \varepsilon_t &= \ln(1 + \varepsilon_n)\end{aligned}\tag{41}$$

onde, σ_n e ε_n são as tensões e deformações nominais obtidas diretamente do ensaio de caracterização. A Figura 67 apresenta a comparação entre a curva nominal e verdadeira para ambos os aços utilizados.

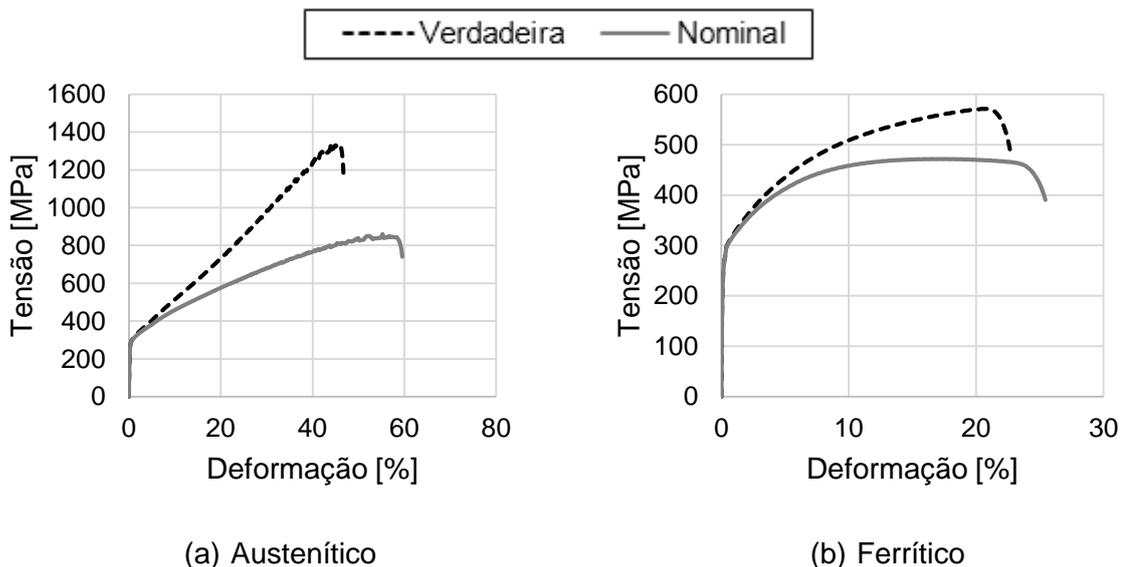


Figura 67 – Curva verdadeira *versus* curva nominal

Para inserir a propriedade plástica do material no programa Abaqus/CAE 6.14 [44] é necessário descontar a parte elástica da deformação do material. Tais valores são demonstrados na Tabela 18.

Tabela 18 – Propriedade plástica do aço inoxidável

Austenítico		Ferrítico	
Tensão [MPa]	Deformação [mm/mm]	Tensão [MPa]	Deformação [mm/mm]
218,74	0,0000	250,44	0,0000
240,55	0,0007	270,66	0,0012
270,81	0,0015	298,80	0,0047
281,09	0,0022	373,78	0,0287
291,65	0,0035	439,39	0,0520
360,54	0,0276	487,58	0,0780
566,86	0,1223	521,32	0,1109
733,54	0,1968	535,37	0,1322
925,60	0,2741	542,00	0,1459
1158,90	0,3641	547,98	0,1630
1282,42	0,4172	549,41	0,1696

Para as propriedades, do parafuso e placa de aço carbono, foram utilizadas propriedades para um elemento rígido ($E = 210 \text{ GPa}$, $\sigma_{0,2\%} = 958 \text{ MPa}$ e $\sigma_u = 1800 \text{ MPa}$), por não ter sido realizado ensaio de caracterização desses materiais e esses não serem o objeto de estudo da pesquisa.

Como condição de contorno, foram utilizados as condições presentes na realização do ensaio, sendo um lado da placa engastado e a outra extremidade a aplicação da carga. Para os modelos numéricos, foi aplicado o carregamento em termos de deslocamento. Em geral, as ligações do tipo D2R, D2S e S1S que utilizaram uma placa de aço carbono, essa é engastada pela garra inferior como mostrado anteriormente na Figura 31 do Item 3.4, e na parte superior é realizado a aplicação da carga pelas garras conectadas as placas de aço inoxidável.

No modelo numérico foi criado um ponto RP-1 associado as superfícies que ficam em contato com as garras, como mostrado na Figura 68.

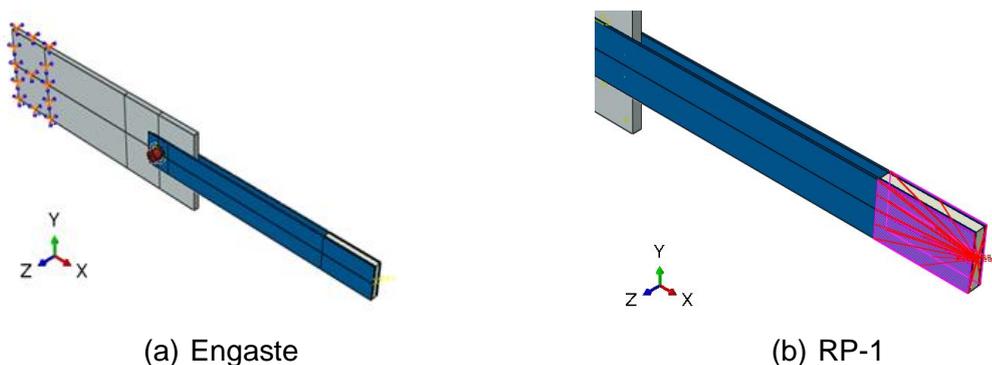


Figura 68 – Condições de contorno

Um estudo de malha foi realizado com o objetivo de encontrar o tamanho de elemento finito que melhor representasse o comportamento da ligação com um menor tempo computacional possível. Sendo assim, a malha com tamanho de aproximadamente de 3 mm, contendo 3 elementos em sua espessura, conseguiu representar muito bem o comportamento obtido experimentalmente, e com um tempo computacional de aproximadamente 3 horas, utilizando um computador com processador *core i7* e 8GB de RAM. Na Figura 69 é demonstrado um dos modelos analisados com um total de 19.985 elementos finitos.

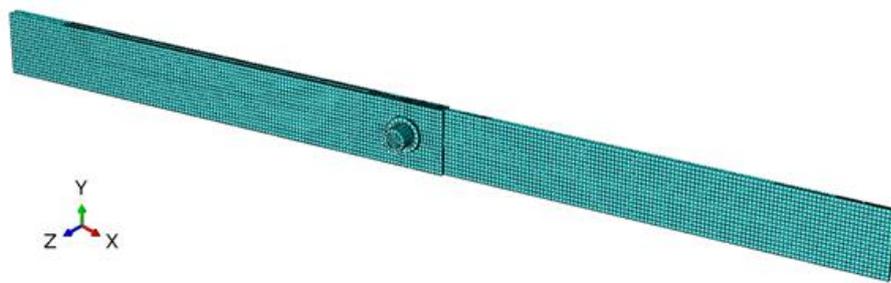


Figura 69 – Malha de elementos finitos

Os resultados obtidos nos modelos numéricos serão apresentados na próxima seção, onde os mesmos são comparados com os obtidos experimentalmente. Uma comparação com os valores obtidos pelos métodos analíticos também é realizada.

4.1 Comparação entre os resultados

Inicialmente, é apresentado um gráfico contendo a curva carga *versus* deslocamento axial de cada modelo numérico junto com o resultado experimental, e ao final, uma tabela contendo as relações entre a carga máxima obtida em cada análise. Além disso, há uma comparação com equações analíticas apresentadas nos capítulos anteriores. Primeiramente, são apresentados os dados referentes ao aço austenítico, e na Figura 70 as ligações compostas por placas de 2 mm, onde no item (a) é apresentado a curva carga *versus* deslocamento axial da ligação com $e_1 = 22\text{mm}$ e no item (b) a curva carga *versus* deslocamento axial para a ligação com $e_1 = 32\text{ mm}$.

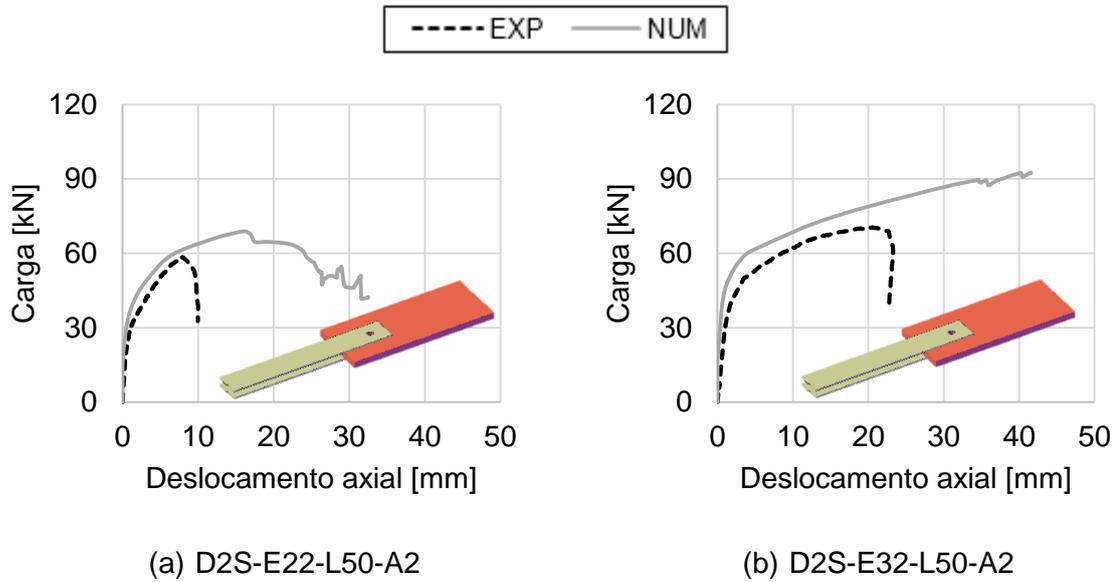
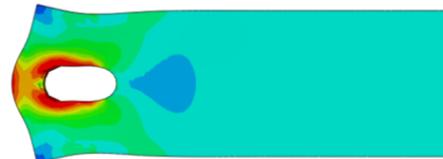


Figura 70 – Ligações do tipo D2S – Austenítico ($t = 2\text{mm}$)

Na Figura 71 e Figura 72 são apresentados a deformada dos testes e do modelo numérico das ligações D2S-E22-L50-A2 e D2S-E32-L50-A2, respectivamente, para fins de comparação.



(a) Experimental

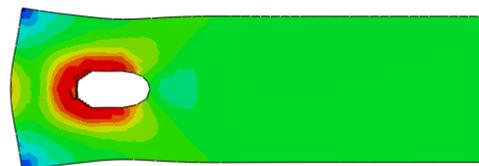


(b) Numérico

Figura 71 – Ligação D2S-E22-L50-A2



(a) Experimental



(b) Numérico

Figura 72 – Ligação D2S-E32-L50-A2

Como observado, para os resultados das ligações com $t = 2$ mm, não foram obtidos uma aproximação tão satisfatória entre os testes experimentais e modelos numéricos, mesmo com um novo estudo de malha. Tal fato, pode estar associado a diferentes variáveis, tais como: a pequena espessura do material que exige um maior controle na aplicação do carregamento, as imperfeições do material, geométrica e erro de fabricação. A amostra para esses testes foram adquiridas em pequena quantidade, sendo apenas para se obter uma complementação do estudo. Apesar do exposto, os modelos numéricos conseguiram representar muito bem o modo de falha observado no ensaio experimental, sendo para a ligação com $e_1 = 22$ mm a ruptura por rasgamento e para $e_1 = 32$ mm por esmagamento. Na Figura 73 e Figura 74, são apresentadas as ligações com dois planos de cortes compostas por duas placas e uma placa de aço inoxidável controlando o dimensionamento, respectivamente.

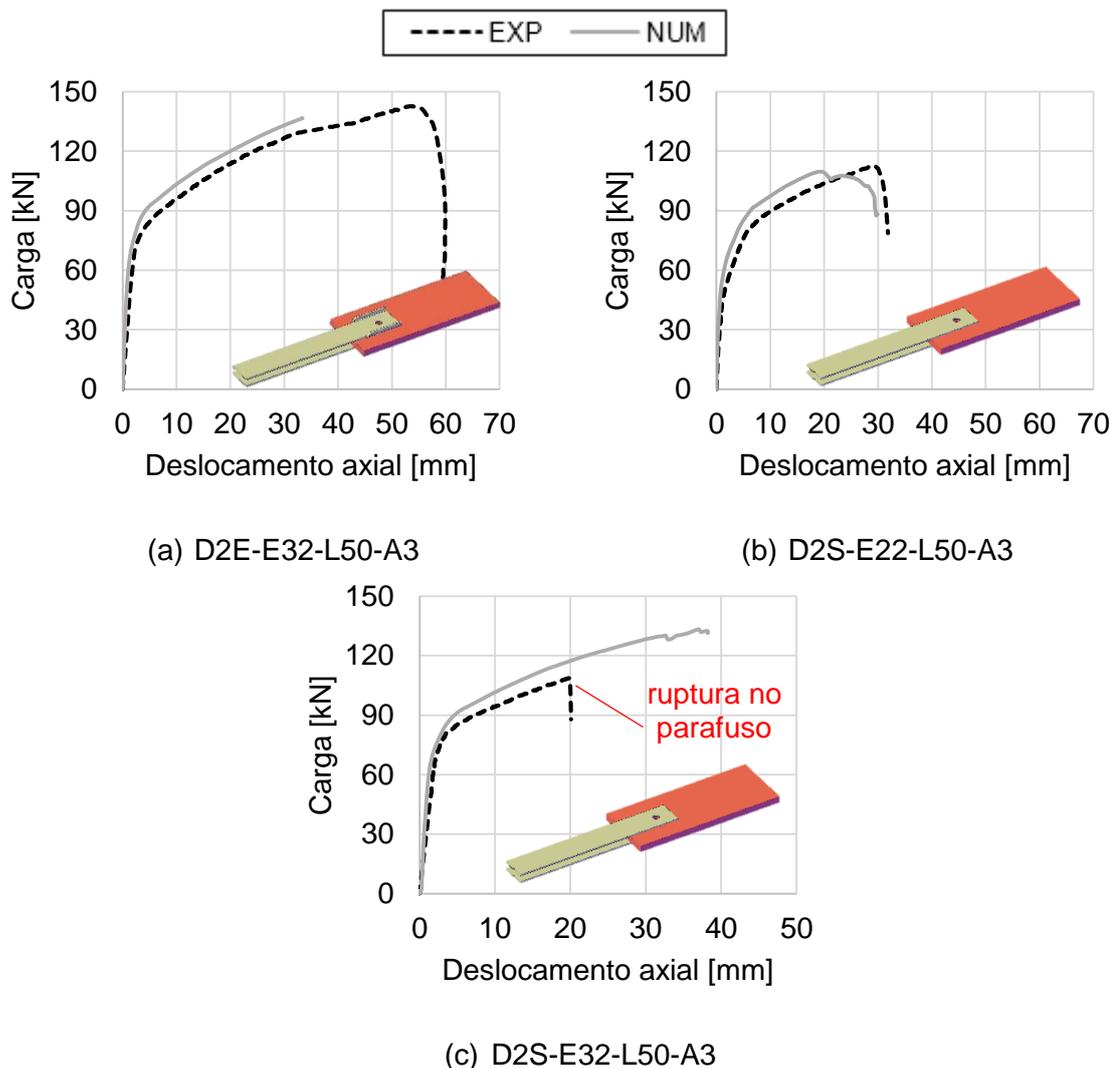


Figura 73 – Ligações do tipo D2E e D2S – Austenítico ($t = 3$ mm)

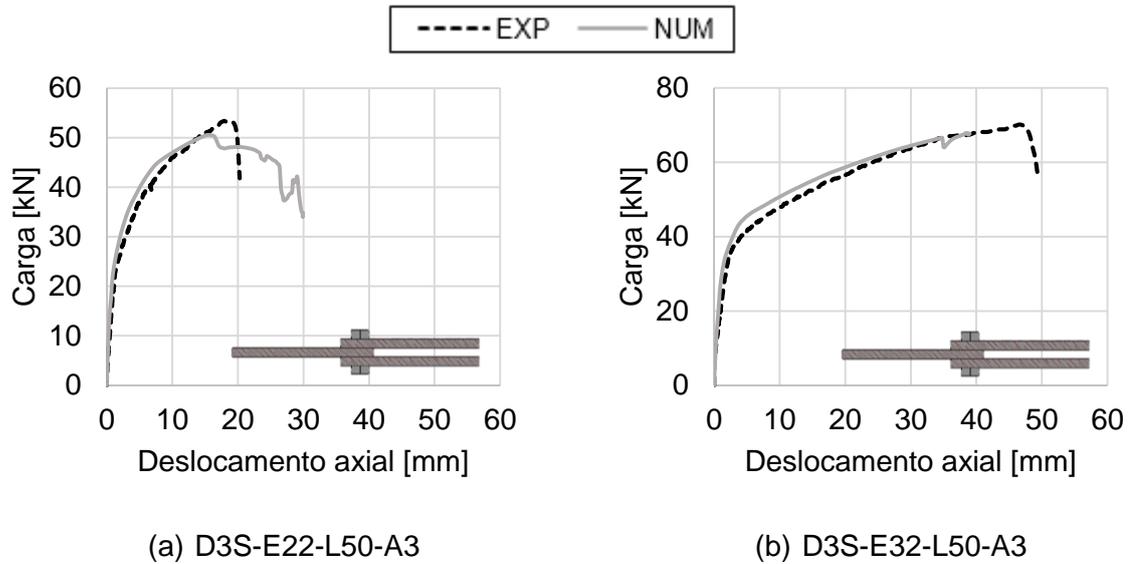


Figura 74 – Ligação do tipo D3S – Austenítico ($t = 3\text{mm}$)

As ligações do tipo S1S com distância $e_1 = 22\text{ mm}$ e $e_1 = 32\text{ mm}$ são apresentadas na Figura 75; para a primeira ocorre uma ruptura no parafuso, não sendo assim possível, a obtenção da carga última suportada pela placa de aço inoxidável, porém, já foi o suficiente para se observar a calibração do modelo numérico.

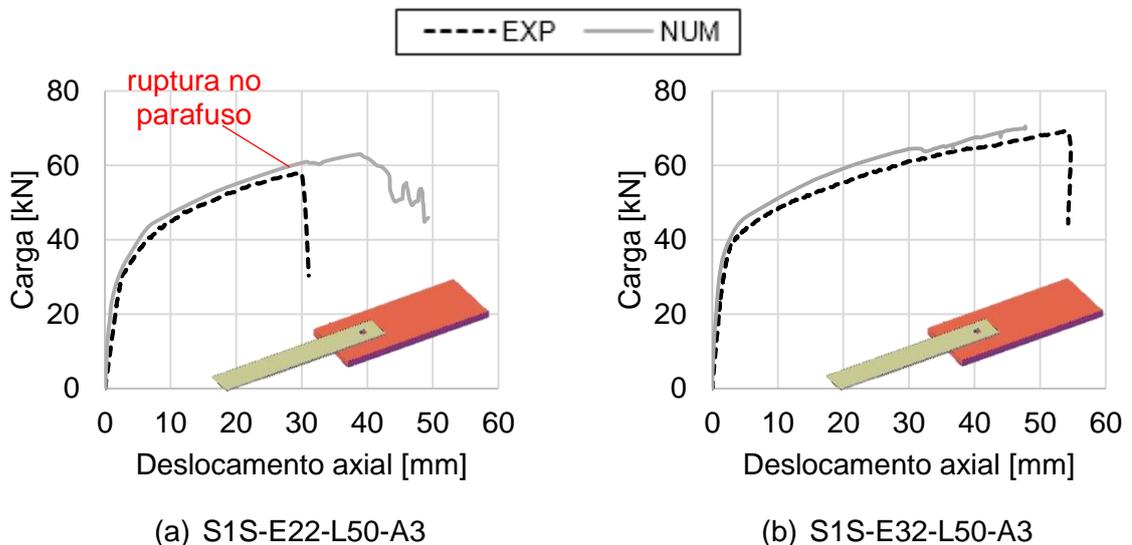


Figura 75 – Ligações do tipo S1S – Austenítico

A Figura 76 apresenta as ligações de um plano de corte compostas por duas placas de aço inoxidável.

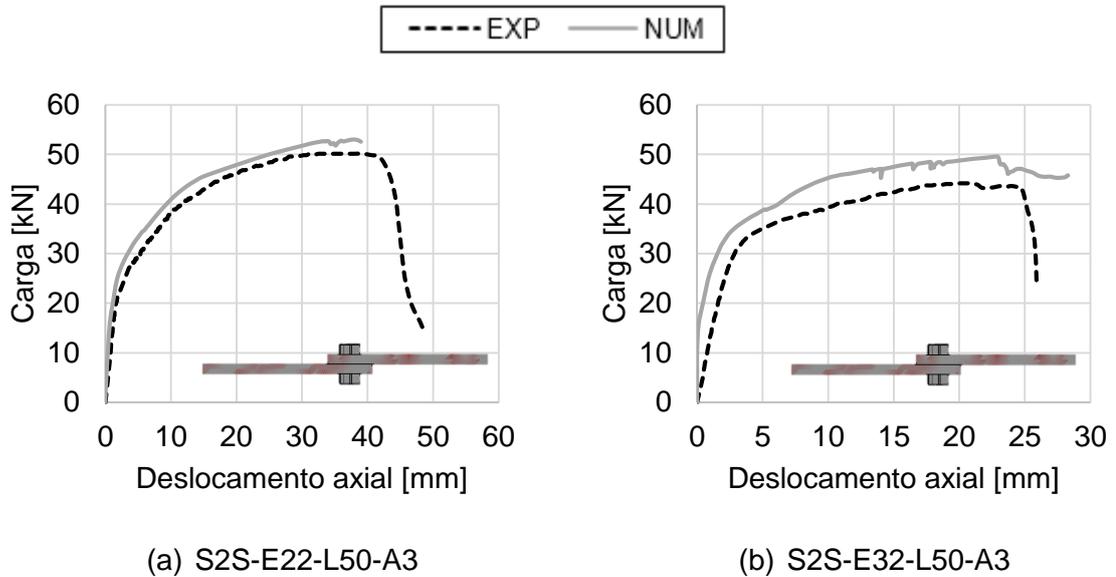


Figura 76 – Ligações do tipo S2S – Austenítico

Como apresentado, no geral, observa-se uma boa aproximação dos modelos numérico com os testes experimentais realizados, especialmente, para as ligações com placas de 3mm, com exceção, do modelo D2S-E32-L50-A3, onde a rigidez da arruela, a sua área de contato com a face placa de aço inoxidável e cabeça do parafuso, influenciam na resistência da ligação devido ao efeito *pulling into line*, e as propriedades desse materiais (parafuso e arruela) não foram consideradas como objeto de estudo dessa dissertação, portanto, não foram implementadas no programa de elementos finitos.

A seguir, são apresentadas as comparações entre os testes experimentais e modelos numéricos das as ligações com aço inoxidável do tipo ferrítico 430. Na Figura 77, são apresentados as ligações de dois planos de cortes com as placas externas controlando o dimensionamento, D2E-E32-L50-F3, D2S-E22-L50-F3 e D2S-E32-L50-F3. E na Figura 78, as ligações com dois planos de cortes compostas por três placas de aço inoxidável, D3S-E22-L50-F3 e D3S-E32-L50-F3, onde a central controla o dimensionamento e está impedida pelas placas externas de ocorrer o efeito *curling*. Por fim, na Figura 79 são apresentados as ligações com um plano de corte com uma placa de aço inoxidável, S1S-E22-L50-A3 e S1S-E32-L50-A3, conectadas em uma placa de aço carbono, além das ligações de dois planos de cortes composta por duas placas de aço inoxidável S2S-E22-L50-A3 e S2S-E32-L50-A3.

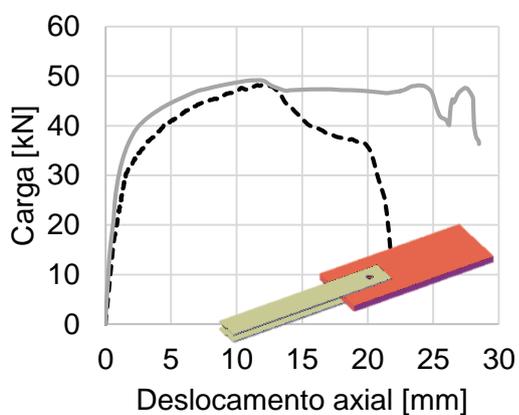
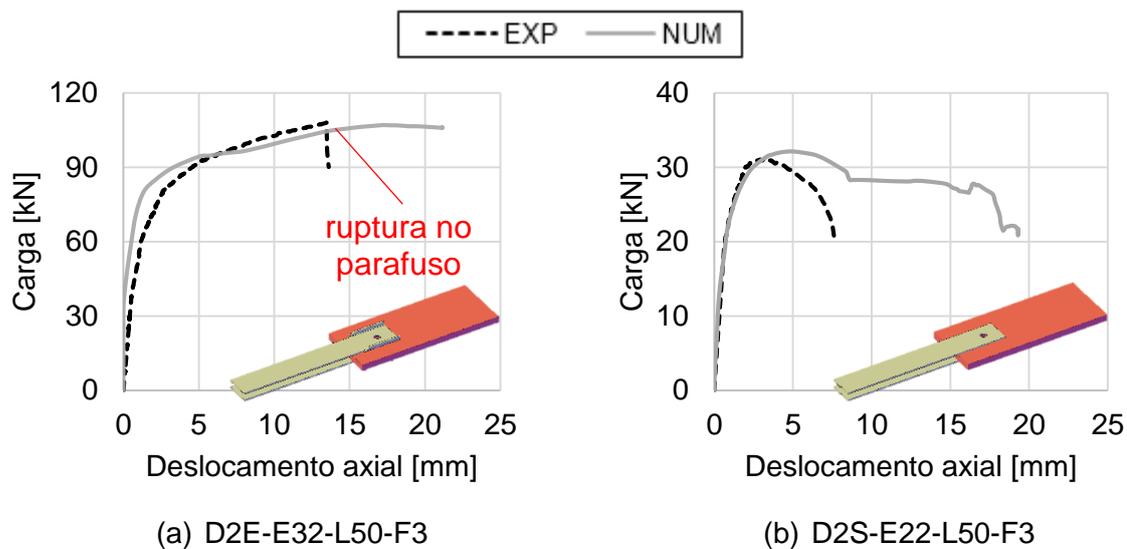


Figura 77 – Ligações do tipo D2E e D2S – Ferrítico

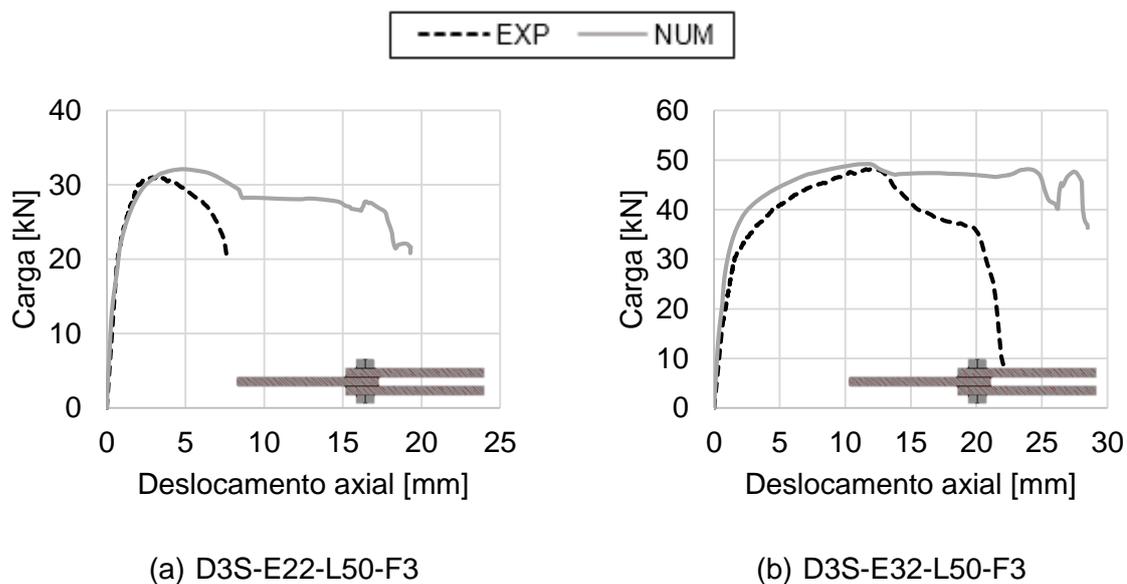


Figura 78 – Ligação do tipo D3S – Ferrítico

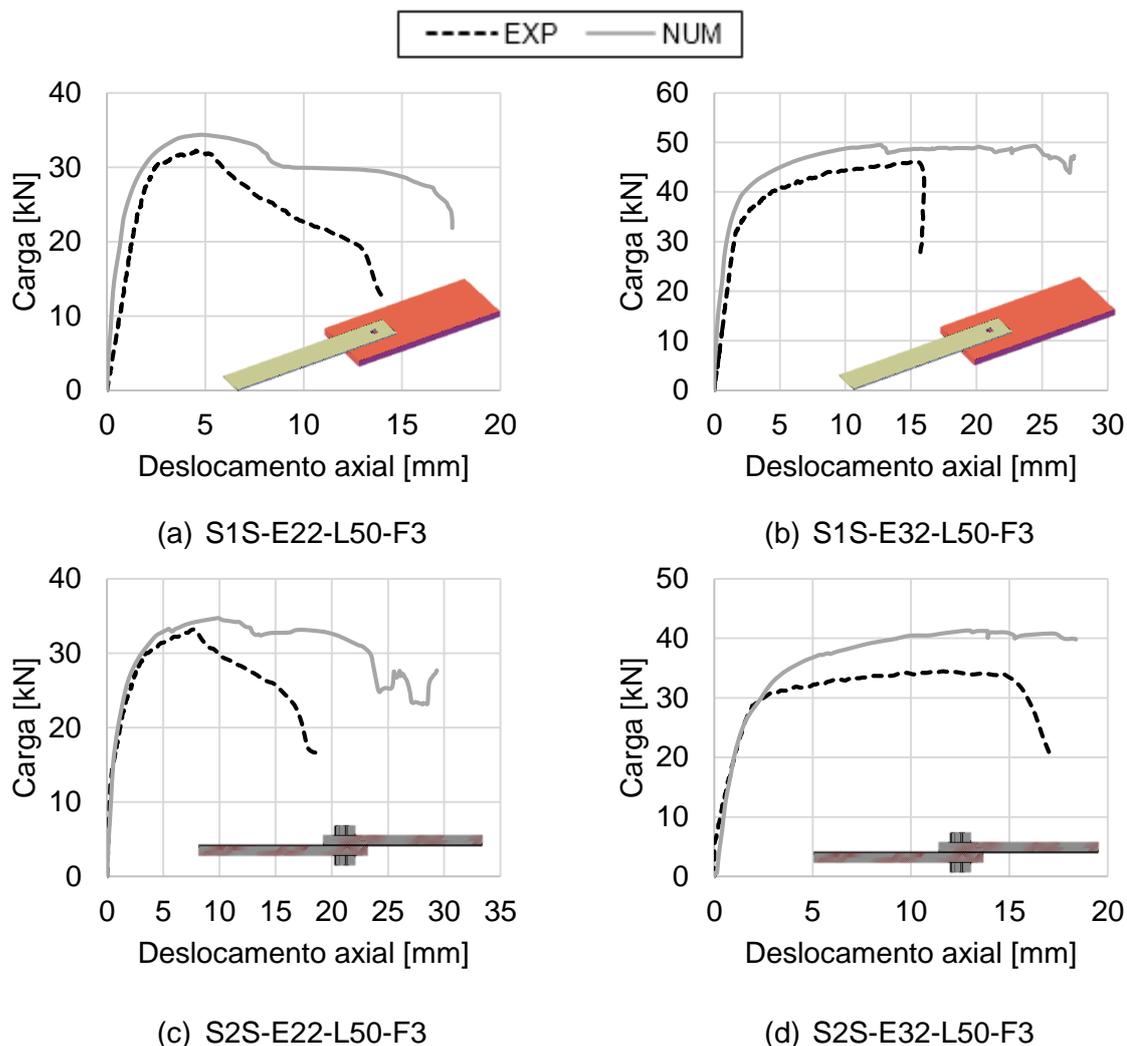


Figura 79 – Ligações do tipo S1S e S2S – Ferrítico

Assim como ocorreu para as ligações com aço austenítico, os modelos com aço ferrítico se aproximaram muito bem aos testes realizados, divergindo apenas, na ligação S2S-E32-L50-F3 devido ao fenômeno *pulling into line*.

Nos ensaios experimentais ocorreu o *curling* em todas as ligações de aço austenítico e ferrítico com distância e_1 de 32 mm, com exceção é claro, do modelo D3S, onde a placa central controla o dimensionamento e as placas de extremidades impedem a ocorrência do fenômeno. Para as ligações com placas enrijecidas, que foram projetadas com o objetivo de minimizar a redução da carga de ruptura ocasionado pelo efeito *curling*, ocorreu o fenômeno apenas na ligação com aço austenítico, porém de forma mais branda, uma vez que o material possui uma alta capacidade de deformação quando comparado com o aço ferrítico. Na Figura 80 é

apresentada a deformada do modelo numérico para a carga última e de uma das placas do teste D2E-E32-L50-A3.

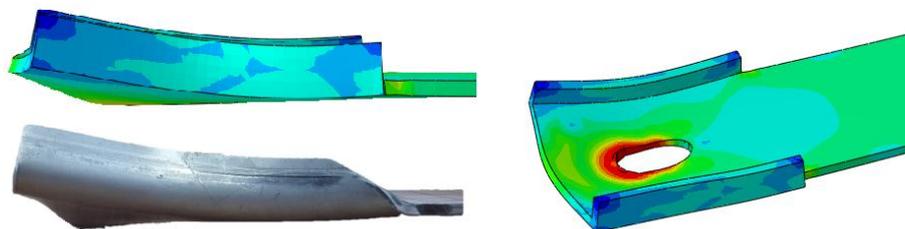


Figura 80 – Comparação da deformada da ligação D2E-E32-L50-A3

Para a ligação com placas enrijecidas de aço ferrítico não foi observado o efeito *curling* no ensaio experimental, como mostrado anteriormente pela instrumentação na Figura 59 (b). Na Figura 81 é apresentada uma comparação da deformada do modelo numérico e experimental, onde é possível observar uma configuração muito semelhante para uma carga última equivalente.

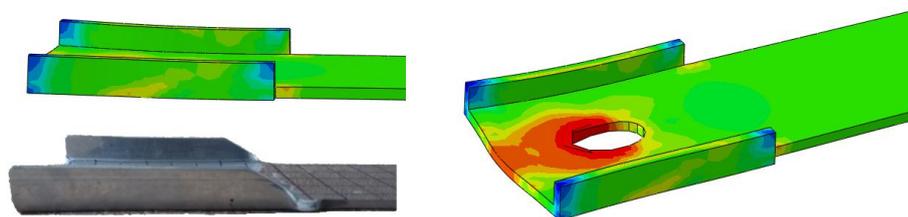


Figura 81 – Comparação da deformada da ligação D2E-E32-L50-F3

Como foi visto na ligação D2E-E32-L50-A3, o enrijecedor não foi capaz de impedir a ocorrência do fenômeno, porém, conseguiu minimizar a influência do *curling* quando comparado com a D2S-E32-L50-A3 (sem enrijecedor), que também é controlada pelo modo de falha esmagamento da placa. Comparando a Figura 80 e Figura 81, percebe-se que a ligação com aço austenítico ocorreu o *curling* e as distribuição das tensões indicam ao modo de falha esmagamento; já para a ligação com aço ferrítico, sem o *curling*, é possível perceber uma tendência ao rasgamento. Pelos ensaios experimentais, não foi possível mensurar a grandeza dessa influência, devido a ruptura no parafuso, mas para as ligações com aço ferrítico, mesmo ocorrendo a ruptura no parafuso do teste com enrijecedor já foi possível obter uma

diferença de 17% quando comparado com o teste D2S-E32-L50-F3 (sem enrijecedor). Assim, é possível concluir que a utilização desse tipo de reforço é uma boa opção para se obter um acréscimo da resistência última de ligações que ocorrem o efeito *curling* e uma representação mais próxima do real do que ocorre nas ligações sem o fenômeno, tal como ligações com perfil “U” que estão sujeitas a ocorrer o mesmo modo de falha, esmagamento da placa. Logo abaixo, Tabela 19 e Tabela 20, são apresentados os resumos contendo a comparação da carga última obtida no ensaio experimental com os modelos numéricos e métodos analíticos. Nas tabelas referidas, estão inclusos o código Eurocode 3, parte 1.3 [22], que apesar de não ser específico para estruturas de aço inoxidável, apresentou uma melhor aproximação com os testes experimentais quando comparado com o Eurocode 3, parte 1.4 [21].

Tabela 19 – Comparação entre os resultados – Austenítico

Teste	Ligação	P_{EXP}/P_{NUM}	$P_{EXP}/P_{EC-1.4}$	$P_{EXP}/P_{EC-1.3}$	$P_{EXP}/P_{AS/NZS/ASCE}$	P_{EXP}/P_{SCI}	P_{EXP}/P_{PROP}
1	D2E-E32-L50-A3	1,04	1,43	1,09	0,82	1,39	1,39
2	¹⁾ D2S-E22-L50-A2	0,85	1,29	0,98	0,74	1,02	1,02
3	D2S-E22-L50-A3	1,03	1,65	1,25	0,94	1,31	1,31
4	¹⁾ D2S-E32-L50-A2	0,76	1,08	0,82	0,61	1,05	1,05
5	²⁾ D2S-E32-L50-A3	0,82	1,09	0,83	0,63	1,06	1,06
6	D3S-E22-L50-A3	1,06	1,56	1,19	0,89	1,19	1,19
7	D3S-E32-L50-A3	1,03	1,40	1,07	0,80	1,07	1,07
8	²⁾ S1S-E22-L50-A3	0,92	1,58	1,28	0,97	1,34	1,34
9	S1S-E32-L50-A3	0,98	1,91	1,07	1,09	1,36	1,36
10	S2S-E22-L50-A3	0,95	1,38	1,12	0,84	1,17	1,17
11	S2S-E32-L50-A3	0,89	1,21	0,67	0,69	0,86	0,86
	Média	0,95	1,51	1,07	0,87	1,19	1,19
	Desvio padrão	0,10	0,25	0,18	0,14	0,18	0,18
	C.O.V	0,11	0,16	0,17	0,16	0,15	0,15

P_{EXP} =carga experimental, P_{NUM} =carga numérica, P_{EC} =previsão dada pelos EC3, P_{SCI} = previsão do novo manual [25]
 $P_{AS/NZS}$ e P_{ASCE} =previsão dada pelas normas AS/NZS, P_{PROP} previsão do método proposto por SALIH [15]

²⁾ Ligações com a ruptura no parafuso, não entraram no cálculo da média, d.p. e c.o.v.

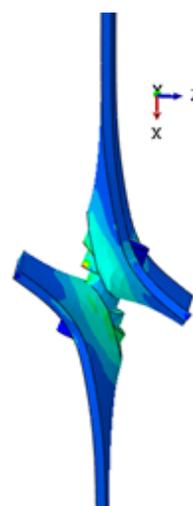
As equações do manual de projeto SCI *Steel Knowledge* [34] para o dimensionamento de ligações aparafusadas com o modo de falha esmagamento são semelhantes as equações propostas por SALIH, GARDNER e NETHERCOT [15],

porém de forma rearranjada, possuindo apenas uma única diferença: quando $\frac{e_2}{d_0} \leq 1,5$ a carga fornecida pelas equações do manual é reduzida em 80%, que pode tornar o seu valor ainda mais conservador.

As ligações com a nota ¹ foram realizadas com placa de 2mm de espessura nominal, que com as propriedades obtidas pelos ensaios de caracterização, não foi possível calibrar o modelo numérico. Já as marcadas com a nota ² foram as que tiveram a ruptura no parafuso, não chegando a carga última esperada. Retirando os resultados das notas citadas, foi possível obter uma aproximação do modelo numérico com o experimental, em média, de 99,71% com um desvio padrão de 6,05%. Podendo assim concluir, que os modelos numéricos com placa de aço inoxidável austenítico de 3 mm de espessura estão validados. Apesar do desvio padrão ter sido muito pequeno, não foi possível obter um valor mais próximo de zero devido a ligação S2S-E32-L50-A3. Nessa ligação, foi constatado o modo de falha *pull-through* induzido pelos fenômenos *pulling into line* e *curling* em que a rigidez da arruela influencia diretamente na carga última da ligação, e esse material não foi caracterizado para inserir suas propriedades reais no programa de elementos finitos. Uma deformada obtida após a ruptura na realização do teste é comparada com a encontrada no modelo numérico, Figura 82.



(a) Experimental



(b) Numérico

Figura 82 – Ligação S2S-E32-L50-A3

Quanto aos métodos analíticos apresentados na Tabela 19, o Eurocode 3, parte 1.4 [21] obteve valores de carga última (P_{EC}), em média, muito conservadores, sendo obtido uma resistência experimental superior em 50,57%. Tal fato está associado a utilização do $f_{u,red}$ definido pelo código. Já para o Eurocode 3, parte 1.3 [22], onde é utilizado a tensão última real do material, foi encontrado valores de carga última bem próximos aos experimentais. Para ambos os códigos europeus, o modo de falha foi o esmagamento da placa para todas as ligações, não prevendo apenas a ruptura das ligações que ocorreram o fenômeno *pulling into line*.

As normas *American Society of Civil Engineers Specification* – ASCE 8-02 [25] e Australiana/Nova Zelândia 4673 [26] resultaram no modo de falha correspondendo a ruptura na seção líquida para todas as ligações, exceto para D2S-E22-L50-A3, D3S-E22-L50-A3 e S1S-E22-L50-A3 em que o modo de falha foi o rasgamento da placa. Porém, na Tabela 19 foram apresentados os valores correspondentes ao modo de falha observado no estudo experimental, sendo rasgamento ou esmagamento da placa. A média dos resultados para as normas *American Society of Civil Engineers Specification* – ASCE 8-02 [25] e Australiana/Nova Zelândia 4673 [26] apresentaram um valor contra a segurança de 13,3% e com a utilização do coeficiente de segurança de 0,7 os resultados seriam conservadores em 17,2%. O método proposto por SALIH, GARDNER e NETHERCOT [15] e o novo manual de projeto obtiveram valores relativamente próximos quando comparados com os ensaios experimentais, sendo conservadores em 19,22%. Contudo, o Eurocode 3, parte 1.3 [22], foi o método analítico que mais se aproximou aos resultados obtidos experimentalmente e numericamente.

As ligações compostas por placas em aço inoxidável do tipo ferrítico apresentaram um comportamento bem distinto as ligações em aço austenítico, uma comparação entre os valores obtidos para as ligações com aço ferrítico é exposto na Tabela 20.

O teste 1 da Tabela 20 resultou na ruptura do parafuso, porém, em um valor de carga última muito próximo ao esperado, sendo assim, essa foi considerada nos cálculos da média, desvio padrão e coeficiente de variação. Na Figura 77(a), apresentada anteriormente, é possível verificar o quanto o modelo numérico se aproximou do resultado experimental.

Tabela 20 – Comparação entre os resultados – Ferrítico

Teste	Ligação	P_{EXP}/P_{NUM}	$P_{EXP}/P_{EC-1.4}$	$P_{EXP}/P_{EC-1.3}$	$P_{EXP}/P_{AS/NZS/ASCE}$	P_{EXP}/P_{SCI}	P_{EXP}/P_{PROP}
1 ³⁾	D2E-E32-L50-F3	1,01	1,72	1,54	1,14	1,96	1,96
2	D2S-E22-L50-F3	0,94	1,44	1,29	0,93	1,34	1,34
3	D2S-E32-L50-F3	0,91	1,40	1,26	0,94	1,61	1,61
4	D3S-E22-L50-F3	0,97	1,44	1,30	0,94	1,30	1,30
5	D3S-E32-L50-F3	0,98	1,52	1,37	1,01	1,37	1,37
6	S1S-E22-L50-F3	0,94	1,39	1,32	0,96	1,37	1,37
7	S1S-E32-L50-F3	0,93	1,94	1,28	1,30	1,63	1,63
8	S2S-E22-L50-F3	0,96	1,42	1,33	0,96	1,38	1,38
9	S2S-E32-L50-F3	0,83	1,46	0,96	0,98	1,23	1,23
	Média	0,94	1,53	1,29	1,02	1,47	1,47
	Desvio padrão	0,05	0,19	0,15	0,12	0,23	0,23
	C.O.V	0,05	0,12	0,12	0,12	0,16	0,16

P_{EXP} =carga experimental, P_{NUM} =carga numérica, P_{EC} =previsão dada pelos EC3, P_{SCI} = previsão do novo manual [25]
 $P_{AS/NZS}$ e P_{ASCE} =previsão dada pelas normas AS/NZS, P_{PROP} previsão do método proposto por SALIH [15]

Mais uma vez, os modelos numéricos se aproximaram aos resultados experimentais, onde foi obtido um valor médio de 94,11% para as ligações em aço ferrítico com um desvio padrão de 5,11%, apresentado na Tabela 20. Por consequência, é possível atestar a calibração dos modelos numéricos. Quanto a previsão do modo de falha, os códigos europeus se mostraram muito precisos, acertando também o tipo de ruptura para as ligações com as placas de aço ferrítico. Com exceção apenas para a ligação S2S-E32-L50-F3, onde o fenômeno *pulling into line* juntamente com o efeito *curling* induziu a ruptura por *pull-through*. Já as normas *American Society of Civil Engineers Specification – ASCE 8-02* [25] e *Australiana/Nova Zelândia 4673* [26] supuseram o modo de falha ruptura na seção líquida para a maioria dos testes, contudo na razão entre a carga do teste e previsão pela norma apresentada na tabela, foi considerado também para o aço ferrítico o valor de ruptura por rasgamento ou esmagamento da placa.

As normas *American Society of Civil Engineers Specification – ASCE 8-02* [25] e *Australiana/Nova Zelândia 4673* [26], apesar de não preverem corretamente o modo de falha da maioria das ligações apresentadas na Tabela 20, como observado também no estudo realizado por YANCHENG e YOUNG [24], alcançou resultados bem satisfatório de carga última, superiores em apenas 1,78%. Para o manual de

projeto SCI [34] e o método proposto por SALIH, GARDNER e NETHERCOT [15] foi alcançado um valor de carga última conservador de 46,55% para as ligações com aço ferrítico.

Comparando os dois tipos de aço inoxidáveis estudados, foi possível perceber a diferença entre os materiais, tanto pelos resultados de carga última obtidos analiticamente, quando em seu comportamento analisado pelos ensaios experimentais e por meio do programa de elementos finitos. O aço inoxidável do tipo austenítico 304 possui uma capacidade de deformação e absorção de esforço de tração bem maior do que a do tipo ferrítico 430; a diferença entre a razão tensão última e tensão de escoamento de ambos os materiais apresentadas no item foram de 3,13 contra 1,68, que comprovam esse fato.

A Tabela 21 apresenta uma comparação adicional para melhor compreensão entre a diferença de comportamento dos aços inoxidáveis austenítico e o aço inoxidável ferrítico. Do lado esquerdo da tabela é exibido a razão entre a mesma ligação de aço austenítico com a de aço ferrítico, já do lado direito é demonstrado a razão entre uma ligação com $e_1 = 32\text{mm}$ e outra do mesmo padrão com $e_1 = 22\text{mm}$.

Tabela 21 – Comparação entre o aço austenítico e ferrítico

TIPO	Razão AUST/FER				Razão E32/E22			
	EXP		NUM		EXP		NUM	
	E32	E22	E32	E22	AUST	FER	AUST	FER
D2E	1,32	-	1,28	-	-	-	-	-
D2S	-	1,79	1,35	1,63	-	1,42	1,22	1,46
D3S	1,46	1,71	1,38	1,58	1,31	1,54	1,34	1,53
S1S	1,50	-	1,42	1,83	-	1,43	1,12	1,44
S2S	1,28	1,51	1,20	1,52	0,88	1,04	0,94	1,19
Média	1,39	1,67	1,33	1,64	1,10	1,36	1,15	1,41
D.P.	11%	15%	9%	14%	31%	22%	17%	15%
C.O.V.	8%	9%	7%	8%	28%	16%	15%	11%

Com o resultado exposto, é evidente que há uma distinção entre o comportamento dos dois tipos de aço inoxidáveis analisados. Porém, percebe-se que a razão entre a tensão última dos materiais de 1,82 (apresentado no Item 3.2) não é proporcional a resistência da ligação, onde as ligações com $e_1 = 22\text{ mm}$ são as que mais se aproximam da razão referida. Tal diferença, pode estar associada a ocorrência do efeito *curling*, que ocorreu nas ligações com $e_1 = 32\text{ mm}$, uma vez que

com os dados apresentados é possível perceber que a diferença entre as razões é menor para a ligação com o fenômeno impedido (D3S). Analisando o lado direito, onde é apresentado o acréscimo da resistência de cada ligação com o aumento do valor de e_1 de 22 mm para 32 mm, é possível concluir que o aumento da resistência é maior para o ferrítico que possui menor capacidade de deformação e é menos afetado por fenômenos de instabilidades quando comparado com o austenítico.

Na Figura 83 abaixo, é apresentado uma comparação entre as deformações obtidas nos ensaios experimentais com os respectivos modelos numéricos. Onde, novamente, é possível observar uma boa aproximação dos modelos numéricos com os ensaios experimentais dos testes com enrijecedores. Para os sem enrijecedores não foram possíveis a medição das deformações devido a deformação para fora do plano excessiva das placas, prejudicando assim, o tipo de extensômetro utilizado.

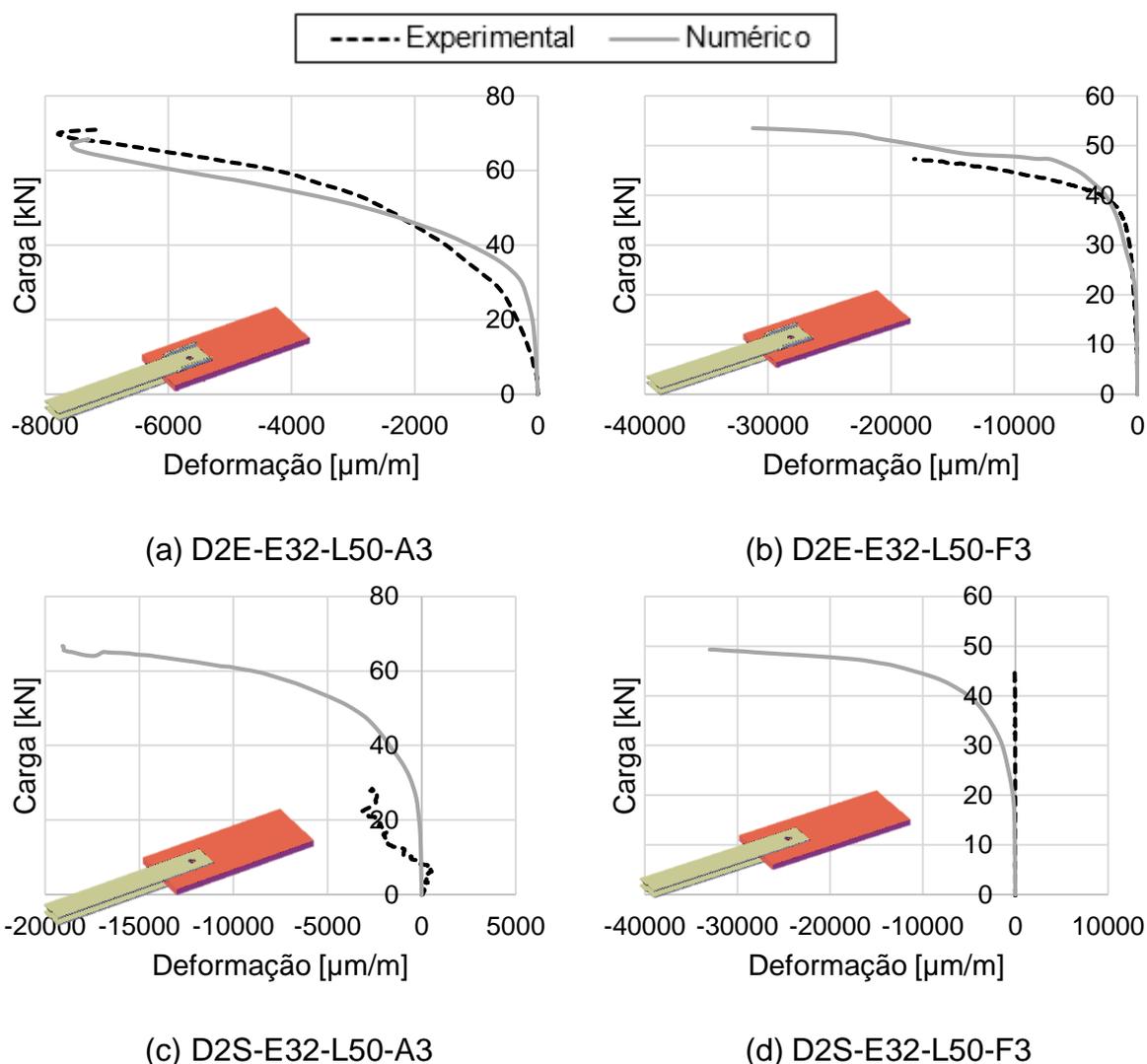


Figura 83 – Comparativo entre as deformações dos testes e modelos numéricos

No próximo item são apresentadas análises numéricas complementares, para consolidar o entendimento da influência do efeito *curling* na ligação.

4.2 Análises complementares

Nessa seção, é apresentado um estudo paramétrico, que contempla as realizações de 20 modelos numéricos adicionais. As análises tem como objetivo avaliar o comportamento do efeito *curling* e sua influência na resistência última das ligações com aço austenítico e ferrítico para os arranjos do tipo D2S e D3S já apresentados nessa dissertação, porém, com variação de alguns parâmetros geométricos, como apresentado na Tabela 22. Uma comparação com as normas e códigos são também apresentadas contendo a relação carga última para cada limite geométrico adotado.

Tabela 22 – Parâmetros geométricos das ligações D2S de aço austenítico

Ligação	d_{parafuso} [mm]	t_{placa} [mm]	d_{furo} [mm]	e_1 [mm]	e_1/d
D2S/D3S - E18 - L50 - A/F 3	12	3	13,00	3S	1,50
D2S/D3S - E24 - L50 - A/F 3	12	3	13,00	3S	2,00
D2S/D3S - E30 - L50 - A/F 3	12	3	13,00	3S	2,50
D2S/D3S - E36 - L50 - A/F 3	12	3	13,00	3S	3,00
D2S/D3S - E48 - L50 - A/F 3	12	3	13,00	3S	4,00

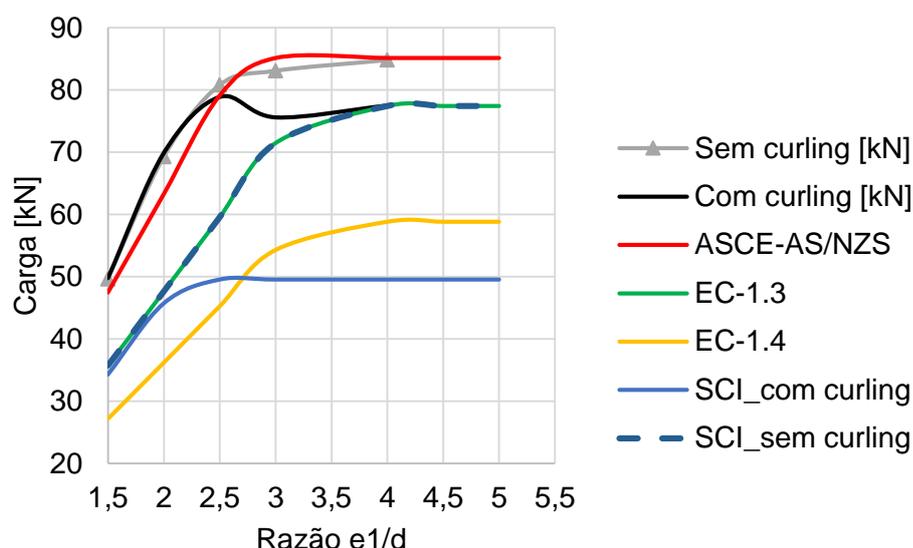
O estudo paramétrico contempla a variação da razão e_1/d em 1,5, 2,0, 2,5, 3,0 e 4,0. Para dois arranjos de ligações, D2S e D3S, onde a primeira está sujeita a ocorrer o efeito *curling*, e na segunda, o fenômeno está impedido de ocorrer, já que a placa central controla o dimensionamento e tem a sua deformação para fora do plano impedida pelas externas.

Os valores de carga última para os modelos com e sem o efeito *curling*, para o aço austenítico, com cada razão e_1/d , são demonstrados na Tabela 23. Sendo que para efeito de comparação, a carga última do modelo com duas placas controlando o dimensionamento foi dividida por dois com o objetivo de obter a resistência de uma única placa.

Tabela 23 – Influência do *curling* para as ligações D2S e D3S de aço austenítico

e_1/d	Com <i>curling</i> [kN]	Sem <i>curling</i> [kN]	Razão
1,5	49,74	49,64	1,00
2	69,87	69,29	0,99
2,5	78,87	80,80	1,02
3	75,59	83,08	1,10
4	77,49	84,80	1,09

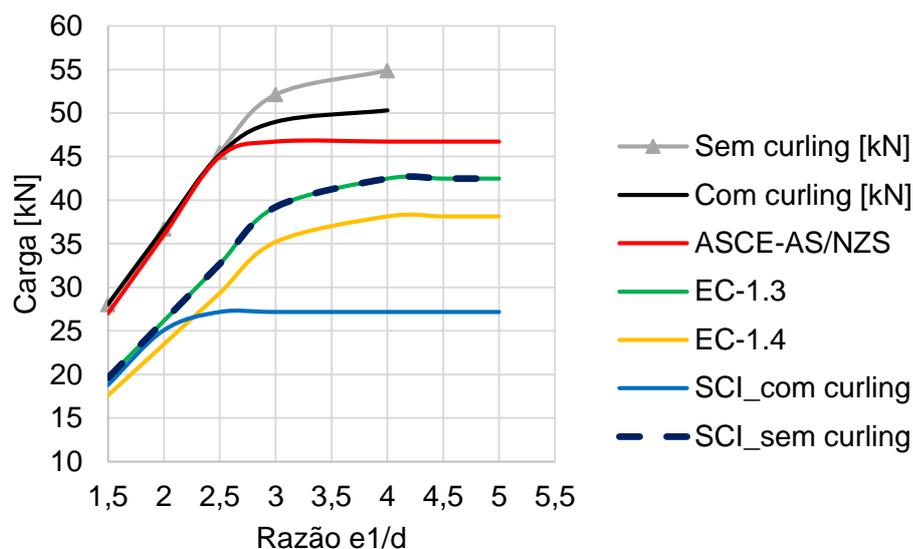
Como apresentado na tabela, o efeito *curling* passou a influenciar a resistência da ligação para $e_1/d \geq 2,5$, assim como foi observado por KIM et al. [19]. Os gráficos correspondentes aos valores apresentados, são demonstrados na Figura 84, assim como as previsões dadas por cada norma e código analisado.

**Figura 84 – Comparação entre a carga versus razão e_1/d das normas e modelos numéricos – Austenítico**

Com o exposto, observa-se que as ligações deixam de adquirir a resistência em uma proporção quase linear até a razão $e_1/d = 2,5$. A partir desse ponto, para a ligação sem enrijecedor, a resistência aumenta de uma forma bem reduzida conforme cresce o valor de e_1 . E para a ligação com o efeito *curling*, o fenômeno passa a influenciar na resistência última da ligação e sua resistência tende a permanecer constante para valores superiores de e_1/d . Para as ligações com aço ferrítico, o mesmo é observado, conforme é apresentado na Tabela 24 e Figura 85.

Tabela 24 – Influência do *curling* para as ligações D2S e D3S de aço ferrítico

e_1/d	Com <i>curling</i> [kN]	Sem <i>curling</i> [kN]	Razão
1,5	28,02	28,03	1,00
2	36,75	36,71	1,00
2,5	45,22	45,49	1,01
3	49,01	52,11	1,06
4	50,33	54,89	1,09

**Figura 85 – Comparação entre a carga versus razão e_1/d das normas e modelos numéricos – Ferrítico**

Comparando o estudo paramétrico realizado entre os dois tipos de aço inoxidáveis, percebe-se que as ligações de aço austenítico com o efeito *curling* começa a sofrer uma influência na carga última mais antecipada, e para uma razão entre o limite geométrico $e_1/d = 2,5$ há uma queda mais abrupta na resistência da ligação. As diferenças entre os materiais estão relacionadas a capacidade de deformação que cada um pode oferecer, onde foi encontrado uma razão entre a tensão última e tensão a 0,2% de deformação de 3,13 e 1,68 para o aço austenítico e ferrítico, respectivamente.

Quanto as previsões dadas pelas normas e código vigentes, as normas *American Society of Civil Engineers Specification – ASCE 8-02* [25] e *Australiana/Nova Zelândia 4673* [26] apresentaram valores de carga última (sem o coeficiente de redução) com uma excelente aproximação. Para uma razão $e_1/d \geq 2,5$ há uma alteração no comportamento da ligação até $e_1/d = 3$, e a partir desse ponto, a

carga começa a ser constante. As demais normas, no geral, obtiveram valores conservadores, sendo o Eurocode 3, parte 1.3 [22] há que melhor se destacou desse grupo, com valores relativamente próximo aos obtidos nos modelos numéricos.

O manual de dimensionamento da SCI *Steel Knowledge* [34], para ligações com dois planos de cortes com a central sendo a crítica (D3S), utiliza a mesma equação para placas espessas. Tal fato deve estar associado a influência do efeito *curling*. Logo, os resultados apresentados na Figura 84 e Figura 85 apresentaram valores próximos aos obtidos nas análises numéricas, assim como ocorreu para o Eurocode 3, parte 1.3 [22]. Já para as ligações com placas finas de um plano de corte ou dois planos de cortes com as externas controlando o dimensionamento, o manual utiliza outros coeficientes para determinação da carga de esmagamento da placa. Com o tipo de ligação estudada nessa seção (D2S), o manual SCI *Steel Knowledge* [34], demonstrou-se muito conservador. Isso ocorre porque para esse tipo de ligação o manual apresenta um coeficiente de redução $k_t = 0,64$, sendo muito rigoroso para os modelos utilizados nesse estudo paramétrico. Para essa equação, o manual apresenta como limite de ganho de resistência o parâmetro $\alpha_b = e_1/(2d_0)$, onde após esse valor, a carga que representa a resistência da ligação se torna constante.

Para o Eurocode 3, parte 1.4 [21] o limite que representa a diferença entre o comportamento da ligação é superior ao dado pela SCI *Steel Knowledge* [34], sendo $e_1/(3d_0)$, que é o mesmo utilizado pelo manual para o dimensionamento de placas espessas. Para essa dissertação, que utilizou um diâmetro do furo com valor nominal de 13 mm, o valor de e_1 correspondente a esse limite ocorre em 38 mm, onde após esse limite, a carga prevista se torna constante. Diferentemente do Eurocode 3, parte 1.3 [22], que é específico para placas finas, o limite é dado por $e_1/(3d)$, utilizando o diâmetro do parafuso no lugar do diâmetro do furo da placa.

Como foi visto, as normas Australiana/Nova Zelândia 4673 [26] apresentaram uma boa precisão com os modelos estudados, e um limite de influência do acréscimo de resistência muito próximo aos observados nas análises. Porém, para as ligações com aço austenítico, onde ocorrem o efeito *curling*, a norma apresentou uma pequena variação contra a segurança, já que não é considerado a influência do fenômeno na resistência última da ligação. Logo, a utilização de um coeficiente de redução com um valor de 0,9, na equação para o modo de falha esmagamento em ligações com dois planos de corte e com $e_1/d > 2,5$, tonaria a previsão da carga última mais próxima dos modelos analisados nessa dissertação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização do aço inoxidável em aplicações estruturais tende a crescer com o aumento de pesquisas nessa área. Pois um dos fatores que o torna ainda pouco usado, é seu elevado custo quando comparado com o aço carbono. Fator, que pode ser minimizado quando é conhecido o seu comportamento e aplicado equações de projetos que representem sua real capacidade. A presente dissertação teve como objetivo avaliar o comportamento de ligações aparafusadas com aço austenítico 304 e ferrítico 430, onde foram analisadas cinco configurações distintas de ligações, sendo três com o parafuso sob dois planos de cortes e duas sob um plano de corte. No total, foram realizados 20 ensaios experimentais com seus respectivos modelos numéricos. Um estudo analítico composto por códigos e normas de aço inoxidáveis também foi realizado, onde estão contidos o Eurocode 3, parte 1.4 [21], a norma *American Society of Civil Engineers Specification – ASCE 8-02* [25], e a norma Australiana/Nova Zelândia 4673 [26]; adicionalmente, foi aplicado a equação para o modo de falha esmagamento da placa dada pelo Eurocode 3, parte 1.3 [22] que trata de placas finas e membros conformados a frio, o método proposto por SALIH, GARDNER e NETHERCOT [15] e o novo manual SCI *Steel Knowledge* [34].

O Eurocode 3, parte 1.3 [22], o manual de projeto SCI *Steel Knowledge* [34], e o método proposto por SALIH, GARDNER e NETHERCOT [15] não apresentaram valores precisos para as ligações com aço ferrítico 430 analisadas nessa dissertação. Porém, para as ligações com aço austenítico foi encontrado valores de carga última muito próximo aos obtidos experimentalmente e por meio do método de elementos finitos, diferentemente dos demais códigos e normas vigentes. Em especial, para esse tipo de aço, se destacou o Eurocode 3, parte 1.3 [22]. Já para o aço ferrítico a formulação analítica que melhor se aproxima dos resultados é a norma *American Society of Civil Engineers Specification – ASCE 8-02* [25] e a norma Australiana/Nova Zelândia 4673 [26], sendo necessário um estudo aprofundado para modificação da equação proveniente ao modo de falha ruptura na seção líquida, que não apresentou resultados tão precisos para as ligações estudadas nessa dissertação.

O efeito *curling* pode influenciar na resistência última de ligações aparafusadas, principalmente das compostas por aço austenítico que possui maior capacidade de

deformação. Em diversos testes realizados, o fenômeno diminuiu a rigidez da ligação, e ainda, juntamente com o fenômeno *pulling into line* alterou o modo de falha esperado pelos códigos e normas vigentes, tornando assim, a redução da carga última mais severa. Experimentalmente, tal redução chegou ao valor máximo de 37% e 28% para o aço austenítico e ferrítico, respectivamente.

A utilização do enrijecedor para atenuar a influência do efeito *curling* mostrou ser satisfatório, podendo obter um acréscimo da resistência de 8 a 17%, conclusões também apresentadas em trabalho de congresso por SOBRINHO et al. [16]. Para facilitar a execução desse tipo de reforço em campo, pode-se adotar a dobra da chapa ao longo de todo o elemento estrutural, sendo necessário um comprimento mínimo de duas vezes a distância entre o eixo do furo e extremidade da placa.

As normas e código vigentes não consideram o efeito *curling* e *pulling into line* como mecanismos de ruptura, sendo esses fenômenos responsáveis pela alteração do modo de falha previsto e/ou redução da carga última de uma ligação. Assim, faz-se necessário a inclusão de parâmetros geométricos para mitigar a influência desses fenômenos como também um fator de redução da carga. O modo de falha *pull-through* não é considerado pelas normas e códigos vigentes, sendo apenas citado no Eurocode 3, parte 1.3 [22], onde é informado que se deve verificar sua resistência por testes dados no anexo nacional de cada país. E esse fenômeno pode causar a ruína de uma ligação com uma carga bem inferior quando comparada por outras previsões. Em linhas gerais, esse modo de falha é induzido pela combinação do efeito *curling* e *pulling into line* e só ocorrem em ligações simples compostas por placas finas de espessuras equivalentes.

Por fim, pode-se concluir que as normas vigentes para o dimensionamento de ligações aparafusadas de aço inoxidável submetidas ao corte são ainda conservadoras, especificamente em ligações com apenas um parafuso. As normas *American Society of Civil Engineers Specification – ASCE 8-02* [25] e *Australiana/Nova Zelândia 4673* [26], que apresentam as mesmas equações de dimensionamento, são as que tiveram os melhores resultados para ligações com aço ferrítico, considerando os ensaios realizados para os modos de falha esmagamento e rasgamento da placa. Para as ligações com aço austenítico as normas citadas oferecem valores inferiores, sendo equilibrado pelo seu fator de redução. Para o dimensionamento mais econômico, e ao mesmo tempo seguro, é mais indicado o uso do novo manual de dimensionamento que corresponde a uma mesma abordagem do

método proposto por SALIH, GARDNER e NETHERCOT [15], considerando placas de aço inoxidável de 3 mm de espessura sujeitas ao modo de falha esmagamento da placa.

5.1 Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, com o objetivo em complementar o estudo realizado nessa dissertação, faz-se necessário a execuções de novos ensaios experimentais com as mesmas configurações apresentadas, porém com o sentido da laminação com um ângulo de 45° e 90° com o carregamento. Para que assim, possa de fato avaliar o comportamento anisotrópico do aço inoxidável em ligações aparafusadas.

Avaliar outras formas de enrijecer a placa para impedir a deformação para fora do plano seria fundamental para melhor compreensão de ligações com aço austenítico, já que o modelo apresentado nessa dissertação foi mais eficiente para o aço ferrítico.

A realização de ensaios com novas ligas de aço inoxidáveis, como os *duplex* e *lean-duplex*, também contribuiria de forma satisfatória para um melhor entendimento dos aços inoxidáveis.

E para aprofundar o conhecimento dos efeitos *curling* e *pulling into line*, são necessários a realização de ensaios com placas de diferentes espessuras, finas e espessas. E por fim, após consolidação dessas variáveis, a realização de um estudo paramétrico extenso com modelos calibrados para contribuir com o refinamento de das equações de projetos, e assim, tornar a utilização do aço inoxidável mais vantajoso em aplicações estruturais.

REFERÊNCIAS

- [1] FERRAZ, H. O Aço na Construção Civil. **Revista Eletrônica de Ciências, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo**, São Carlos, n. Número 22, p. 16, 2003.
- [2] SOARES, M. V. C. **Comportamento Estrutural de Tubos Circulares de Aço Inoxidável**. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2017.
- [3] DUARTE, H. P. C. S. G. **Avaliação de colunas tubulares quadradas em aço inoxidável**. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. Rio de Janeiro, p. 141. 2017.
- [4] BADDOO, N. R. Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities. **Elsevier Ltd**, n. Journal of Constructional Steel Research 64, p. 1199-1206, 2008.
- [5] BADDOO, N. **Designing Structural Stainless Steel Members To Eurocode 3**. SCI Manager, Materials, explains the engineering techniques required to design stainless steel sections to Eurocode 3. [S.l.]. 2009.
- [6] REDDOT DESIGN MUSEUM. museum red dot, 2017. Disponível em: <<https://www.museum.red-dot.sg/marina-bay-art-and-design-guide-helix-bridge/>>. Acesso em: 23 jan. 2019.
- [7] GEDGE, G. Structural uses of stainless steel — buildings and civil engineering. **Elsevier Ltd**, n. Journal of Constructional Steel Research 64, p. 1194–1198, 2008.
- [8] MEPS INTERNATIONAL LTD. Free Steel Prices. **World Steel Prices**, 2019. Disponível em: <<https://worldsteelprices.com/>>. Acesso em: 17 Janeiro 2019.
- [9] BATISTA, G. D. C. **Estudo experimental e numérico de ligações aparafusadas em aço inoxidável submetidas à tração**. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. Rio de Janeiro, p. 115. 2018.
- [10] EUROPEAN STANDARD. **Stainless steels - Part 3: Technical delivery conditions for semi-finished products, bar, rods and sections for general purposes**. Brussels: European committee for standardization, p. 35. 1995.

- [11] FREIRE, R. **Estudo experimental e numérico do comportamento de peças tracionadas em aço inoxidável**. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. Rio de Janeiro, p. 102. 2016.
- [12] SANTOS, J. D. J. **Comportamento Estrutural de Elementos em Aço Inoxidável**. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. Rio de Janeiro, p. 184. 2008.
- [13] FULL ESTRUTURAS. Ligações soldadas e parafusadas, 2016. Disponível em: <<http://fullestruturas.com.br/ligacoes-soldadas-e-parafusadas/>>. Acesso em: 23 jan. 2019.
- [14] #CYPECAD. **Deskgran**, 2018. Disponível em: <<https://deskgram.net/explore/tags/Cypecad>>. Acesso em: 23 jan. 2019.
- [15] SALIH, E. L.; GARDNER, L.; NETHERCOT, D. A. Bearing failure in stainless steel bolted connections. **Elsevier Ltd.**, n. Engineering Structures 33, p. 549–562, 2011.
- [16] SOBRINHO, K. D. P. et al. Avaliação do Efeito Curling em Ligações Aparafusadas em Aço Inoxidável Submetida a Esforço de Tração Uniaxial. **XIII SIMMEC 2018 - Simpósio de Mecânica Computacional**, Vitória, ES, 29 Outubro 2018. 15. Disponível em: <<https://doity.com.br/media/doity/submissoes/artigo-9101123db01122938dc950fd184c1d7f4fc6e3cc-arquivo.pdf>>.
- [17] ANDRADE, S.; VELLASCO, P. **Comportamento e projeto de estruturas de aço**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier: Puc Rio, 2016. 408 p.
- [18] BANBURY, A.; KELLY, D. W. A study of fastener pull-through failure of composite laminates. Part 1: Experimental. **Elsevier Ltd**, v. Composite Structures, p. 241-254, 199. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822399000094>>.
- [19] KIM, T. S. et al. Investigation on ultimate strength of thin-walled steel single shear bolted connections with two bolts using finite element analysis. **Elsevier Ltd**, n. Thin-Walled Structures 47, p. 1191–1202, 2009.

- [20] SALIH, E. L.; GARDNER, L.; NETHERCOT, D. A. Bearing failure in stainless steel bolted connections. **Elsevier Ltd.**, n. *Engineering Structures* 33 (2011), p. 549-562, 2010.
- [21] EUROPEAN STANDARD. **Eurocode 3 - Design of steel structures: Part 1-4: General rules - Supplementary rules for stainless steels**. Brussels: European committee for standardization, p. 35. 2006.
- [22] EUROPEAN STANDARD. **Eurocode 3 - Design of steel structures: Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting**. Brussels: European committee for standardization, p. 133. 2006.
- [23] EUROPEAN STANDARD. **Eurocode 3 - Design of steel structures: Part 1-8: Design of joints**. Brussels: European committee for standardization, p. 133. 2010.
- [24] YANCHENG, C.; YOUNG, B. Structural behavior of cold-formed stainless steel bolted connections. **Elsevier Ltd.**, n. *Thin-Walled Structures* 83, p. 147-156, 2014.
- [25] AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **SEI/ASCE-8-02: Specification for the design of cold-formed stainless steel structural**. Reston. 2002.
- [26] AUSTRALIAN/NEW ZEALAND STANDARD. **AS/NZS 4673: Cold-formed stainless steel structures**. Sydney/Wellington, p. 130. 2001.
- [27] ZADANFARROKH, F.; BRYAN, E. R. Testing and design of bolted connections in cold-formed steel sections. **Proceeding of the eleventh international speciality conference on cold-formed steel structures**, Rolla, MO, USA: University of Missouri-Rolla, p. 625–62, 1992.
- [28] ROGERS, C. A.; HANCOCK, G. J. Bolted connection tests of thin G550 and G300 sheet steel, The University of Sydney, 1997. ISSN research report, no. R749.
- [29] AUSTRALIAN STANDARD. **AS 1391: Metallic materials - Tensile testing at ambient temperature**. Sydney, p. 68. 2007.
- [30] KIM, T. S.; YOO, J. H.; ROEDER, C. W. Experimental investigation on strength and curling influence of bolted connections in thin-walled carbon steel. **Elsevier Ltd**, n. *Thin-Walled Structures* 91, p. 1-12, 2015.
- [31] ALIBRAHEMY, M. et al. Finite Element Analysis of Cover Plate Joint Under Ultimate Loading. **Elsevier Ltd.**, n. *Procedia Engineering* 156, p. 16-23, 2016.

- [32] AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **ANSI/AISC 360-10 Specification for structural steel buildings**. [S.l.]. third edition, 2013.
- [33] HENRIQUES, J. et al. Overlap Shear Connections In Bearing In Thin-Walled Stainless Steel Structures. **Eighth International Conference on THIN-WALLED STRUCTURES - ICTWS 2018**, Lisbon, Portugal, 24-27 July 2018. 20.
- [34] SCI STEEL KNOWLEDGE. **Design Manual For Structural Stainless Steel - 4th Edition**. The Steel Construction Institute - SCI. [S.l.], p. 284. 2018. (ISBN 13: 978-1-85942-226-7).
- [35] EUROPEAN STANDARD. **Eurocode 3 - Design of steel structures: Part 1-1: General rules and rules for buildings**. Brussels: European committee for standardization, p. 82. 2003.
- [36] AUSTRALIAN/NEW ZEALAND STANDARD. **AS/NZS 4600: Cold-formed steel structures**. Sydney/Wellington, p. 153. 2005.
- [37] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 6892-1:2013 Versão Corrigida 2:2018: Materiais metálicos — Ensaio de Tração: Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro, p. 70. 2013.
- [38] HUANG, Y; YOUNG, B. The Art of Coupon Tests. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 96, p. 159-175, 2014. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10722/200516>>.
- [39] SANTOS, J. D. J. **Estudo experimental de ligações aparafusadas de aço inoxidável submetidas à tração**. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica. Rio de Janeiro, p. 261. 2014.
- [40] BELENUS. **Parafusos e porcas - Catálogo 2014**. [S.l.], p. 287. 2014.
- [41] WWW.CCPVIRTUAL.COM.BR. **CCP parafusos e ferramentas**, 2018. Disponível em: <<https://www.ccpvirtual.com.br/parafuso-allen-com-cabeca-de-aco-liga-m-12-1-75-x-70/p>>. Acesso em: 28 ago. 2018.
- [42] CORDEIRO, M. **Análise experimental de estruturas**. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 22. 2018.
- [43] SIDER. Estojo astm a193 b7. **Sider agilidade com qualidade**, 2018. Disponível em: <<https://www.sider.com.br/estojo-astm-a193-b7>>. Acesso em: 24 dez. 2018.

[44] ABAQUS/CAE 6.14-5. **Theory Reference**. SIMULIA - Inc. [S.I.]. 2014.